

ISSN 2663-4228 (Print)  
ISSN 2663-4236 (Online)

# Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ  
ЖУРНАЛ

Основан в 1997 году,  
«Серия Г: Технические науки»  
основана в 2018 году

---

Серия Г:  
Технические  
науки

---

3/2022

---

## **Редакционная коллегия журнала**

**«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»**

**Главный редактор – д-р техн. наук, проф. В.В. Данилов.**

**Зам. главного редактора – канд. техн. наук И.А. Третьяков.**

**Ответственный секретарь – канд. техн. наук Е.Д. Пометун.**

**Члены редколлегии:** канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. **П.В. Асланов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **В.Д. Коренев**; канд. техн. наук **Е.М. Силенко**; канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **А.А. Курушин**; канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслен**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; д-р техн. наук, доц. **К.А. Вытовтов**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; канд. техн. наук **Т.В. Шарий**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; д-р техн. наук, проф. **С.М. Сафьянц**; д-р физ.-мат. наук, д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башевая**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, проф. **Е.В. Горохов**; председатель Госкомэкополитики при Главе ДНР **Р.В. Кишкан**; д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; д-р архитектуры, доц. **Н.В. Шолух**.

## **The Editorial Board of the journal**

**«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»**

**The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. V.V. Danilov.**

**The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech. I.A. Tretiakov.**

**Assistant Editor – Cand. of tech. E.D. Pometun.**

**The Members of the Editorial Board:** Cand. of phys. and math., senior researcher **P.V. Aslanov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., docent **V.D. Korenev**; Cand. of tech. **E.M. Silenko**; Cand. of tech., senior researcher **A.A. Kurushin**; Cand. of tech., docent **I.A. Molokovskii**; Cand. of tech., docent **V.V. Paslen**; Cand. of phys. and math., docent **V.I. Timchenko**; Dr. of tech., docent **K.A. Vytovtov**; Cand. of tech., docent **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Zavadskaia**; Dr. of tech., docent **S.A. Zori**; RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov**; Dr. of tech., prof. **M.N. Cheptsov**; Cand. of tech. **T.V. Sharpii**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Cand. of tech., docent **S.V. Gridin**; Dr. of tech., prof. **S.M. Safiants**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Cand. of tech., docent **T.S. Bashevaia**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., prof. **E.V. Gorokhov**; Chairman of the State Committee on Ecological Policy at the Head of the DPR **R.V. Kishkan**; Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; Dr. of arch., docent **N.V. SHolukh**.

**Адрес редакции:** ГОУ ВПО «ДОННУ», ул. Университетская, д. 24, г. Донецк, ДНР, РФ, 283001  
**Тел.:** +7 (856) 302 07 81      **E-mail:** [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)      **URL:** <http://donnu.ru/vestnikG>

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК**) (Приказы МОН ДНР №440 от 06.03.2020 г., №42 от 26.01.2021 г.) по следующим группам научных специальностей (специальностям): **05.11.00** – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; **05.12.00** – Радиотехника и связь; **05.13.00** – Информатика, вычислительная техника и управление; **05.14.04** – Промышленная теплоэнергетика; **05.23.19** – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): [http://elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=69984](http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984)

Журнал включен в международную индексационную научометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»:  
Протокол №7 от 07.10.2022 г.*

# **Вестник Донецкого национального университета**

**Серия Г: Технические науки**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

**ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,  
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ**

**Номер посвящён 85-летию  
Донецкого национального  
университета**

**№ 3/2022**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Вступительное слово	3
---------------------	---

### **ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ**

<i>Лозинская В.Н., Молоковский И.А., Яремко И.Н.</i> Разработка метода обеспечения параметров качества обслуживания в LTE-сетях на основе алгоритма планировщика восходящего канала	4
---	---

<i>Алексейчик Л.В., Курушин А.А.</i> Моделирование многомодового цилиндрического резонатора миллиметрового диапазона волн	13
---	----

### **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

<i>Аверин Г.В., Звягинцева А.В.</i> Обоснование положений термодинамики идеального газа методами математического моделирования	21
--	----

<i>Третьяков И.А.</i> Сегментация экспериментальных кривых спектрограмм технических каналов утечки информации	32
---	----

<i>Иваница С.В., Иванников Д.Д.</i> Оценка использования метода мультирешения функции перекрытия в отказоустойчивой сенсорной системе	37
---	----

<i>Третьяков И.А., Данилов В.В.</i> Элементы автоматизированных систем измерения параметров поверхностных акустических волн посредством методов оптического зондирования	46
--	----

### **ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

<i>Бирюков А.Б., Турулена Ю.О.</i> Совершенствование расчетного метода определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности	52
--	----

### **ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

<i>Берестовая А.А., Шаповалов В.В.</i> Использование отходов пероксидных компонентов средств регенерации воздуха в технологии получения функциональных материалов	57
---	----

### **ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА**

Правила для авторов	65
---------------------	----

# Bulletin of Donetsk National University

Series G: Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,  
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 85th  
anniversary of Donetsk National  
University

№ 3/2022

## CONTENTS

Opening remark	3
----------------	---

### ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

<i>Lozinskaia V.N., Molokovskii I.A., IAremko I.N.</i> Development of a method for providing quality of service parameters in LTE networks based on the algorithm of the uplink scheduler	4
---	---

<i>Alekseichik L.V., Kurushin A.A.</i> Modeling of a multimode cylindrical resonator of the millimeter wave range	13
---	----

### INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Averin G.V., Zviagintseva A.V.</i> Substantiation of the provisions of the thermodynamics of an ideal gas by mathematical modeling methods	21
---	----

<i>Tretiakov I.A.</i> Segmentation of experimental spectrogram curves of technical channels of information leakage	32
--	----

<i>Ivanitsa S.V., Ivannikov D.D.</i> Evaluation of the use method of multiresolution overlapping function in a failure-safe sensor system	37
---	----

<i>Tretiakov I.A., Danilov V.V.</i> Elements of automated systems for measuring parameters of surface acoustic waves by means of optical sensing methods	46
--	----

### ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Biriukov A.B., Turulina IU.O.</i> Improvement of the calculation method for determining the rational operating parameters of a flow furnace with a mechanized hearth operating under variable productivity conditions	52
--	----

### TECHNOSPHERE SAFETY

<i>Berestovaia A.A., SHapovalov V.V.</i> The use of waste peroxide components of air regeneration means in the technology of obtaining functional materials	57
---	----

### INFORMATION SECTION

Instructions for authors	65
--------------------------	----

## **Уважаемые коллеги!**

В связи с вхождением Донецкой Народной Республики в состав Российской Федерации редакционной коллегией принято решение актуализировать названия рубрик журнала в соответствии с Номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.02.2021 г. № 118 (с изменениями и дополнениями от 27.09.2021 г., 11.05.2022 г.).

Таким образом:

Рубрики «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы» и «Радиотехника и связь» объединены в одну с новым названием «Электроника, фотоника, приборостроение и связь», соответствующую одноименной группе научных специальностей «2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь».

Рубрика «Информатика, вычислительная техника и управление» меняет название на «Информационные технологии и телекоммуникации» и соответствует одноименной группе научных специальностей «2.3. Информационные технологии и телекоммуникации».

Рубрика «Промышленная теплоэнергетика» в связи с упразднением данного наименования в актуальной Номенклатуре меняет название на «Энергетика и электротехника» и соответствует одноименной группе научных специальностей «2.4. Энергетика и электротехника».

Рубрика «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства» в связи с изменением соответствующей группы научных специальностей и наименования научной специальности в актуальной Номенклатуре меняет свое название на «Техносферная безопасность» и соответствует одноименной группе научных специальностей «2.10. Техносферная безопасность».

Обращаем Ваше внимание, что список групп научных специальностей (специальностей), по которому журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий (Перечень ВАК) на данный момент остается без изменений.

Главный редактор



В.В. Данилов

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.39

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА  
ОБСЛУЖИВАНИЯ В LTE-СЕТЯХ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА  
ПЛАНИРОВЩИКА ВОСХОДЯЩЕГО КАНАЛА

© 2022 Лозинская В.Н., Молоковский И.А., Яремко И.Н.

В настоящей работе произведено теоретическое обоснование и имитационное моделирование предложенного метода обеспечения параметров качества обслуживания в LTE-сетях. Данный подход позволяет увеличить эффективность использования ресурсов при снижении величины задержки на перепланирование.

**Ключевые слова:** параметры качества обслуживания, LTE-сеть, эффективность использования ресурсов, задержка на перепланирование.

**Введение.** Реализация большинства новых технологий основана на IP (Internet Protocol, Интернет-протокол). Например, концепция современной LTE (Long Time Evolution, эволюция с «хорошой» перспективой) технологии состоит в передаче нескольких высококачественных услуг, таких как потоковое видео, VoIP (Voice over Internet Protocol, передача голоса по Интернет-сетям), онлайн-игры и все, что связано с широкополосным доступом в Интернет, по единой среде передачи. Следовательно, необходимо обеспечить требуемое качество обслуживания и желаемую производительность. Это достигается за счет реализации ряда механизмов, направленных на решение задач эффективного использования пропускной способности беспроводной сети. К таким механизмам относят следующие: планирование обслуживания пакетов нисходящей и восходящей линий связи; управление радиоресурсами (например, обнаружение и выполнение хендовера, балансировка нагрузки и т. д.) и контроль мощности.

**Постановка задачи.** К проблемам обеспечения параметров качества обслуживания в LTE-сетях относят следующие: эффект затухания канала; задержка в очереди и переполнение буфера базовой станции (БС); вариация пропускной способности нисходящего и восходящего пользовательских каналов; задержка передачи пакета сигнализации и получение его подтверждения; изменение мощности. Для управления эффектами затухания канала радиоинтерфейса, мощность БС управляется планировщиком пакетов нисходящей линии связи. Аналогично, в направлении восходящей линии связи, планировщик пакетов дает команду пользовательскому терминалу отрегулировать мощность, чтобы преодолеть эффект замирания канала линии связи. Кроме того, процесс передачи обслуживания или хэндовер позволяет UE (User Equipment, пользовательское оборудование) получать обслуживание при перемещении между базовыми станциями, путем обеспечения соответствующего состояния радиоканала.

Согласно вышеперечисленному, неправильное управление мощностью [1] приводит к отбрасыванию пакетов и механизму повторной передачи, а неправильные параметры конфигурации передачи обслуживания приведут к сбою или сценарию сброса вызова. Таким образом, целью исследовательской работы является повышение эффективности использования ресурсов в LTE-сетях за счет разработки метода обеспечения параметров качества обслуживания.

**Алгоритм хэндовера на основе самоорганизующихся параметров.** Согласно концепции предложенного алгоритма хэндовера на основе самоорганизующихся параметров (Handover Detection Self-Organizing-Handover Parameters, HD-SOHP), происходит анализ отчета об измерениях и производит соответствующие вычисления, чтобы уменьшить количество ложных срабатываний. Таким образом, обнаружение события передачи обслуживания A1 представлено как (1):

$$\Phi_{serv}^{(i)} \geq \Psi_{A1} + \Theta_{A1}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{serv}^{(i)}$  – значение RSRP (Reference Signals Received Power, Мощность принимаемых опорных сигналов) для  $i$ -го пользователя оценённое обслуживающей БС;

$\Psi_{A1}$  – оператор, определяющий пороговое значение для определения события передачи обслуживания A1;

$\Theta_{A1}$  – запас по гистерезису, добавленный для управления ложным триггером события A1.

Аналогично, событие A2 обнаружения хэндовера можно представить, как (2):

$$\Phi_{serv}^{(i)} \leq \Psi_{A2} + \Theta_{A2}, \quad (2)$$

где  $\Psi_{A2}$  – заданное оператором пороговое значение для обнаружения события A2;

$\Theta_{A2}$  – добавленный запас по гистерезису для управления ложным триггером события A2.

Событие A3 обнаружения хэндовера можно представить, как (3):

$$\Phi_{serv}^{(i)} - \Phi_{neib_j}^{(i)} \geq \Psi_{A3} + \Theta_{A3}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{neib_j}^{(i)}$  – значение RSRP для  $i$ -го пользователя оценённое  $j$ -ой соседней БС;

$\Psi_{A3}$  – заданное оператором значение смещения для обнаружения события A3

$\Theta_{A3}$  – добавленный запас по гистерезису для управления ложным триггером события A3.

Согласно (4) и (5) определяются значения RSRP для  $i$ -го пользователя, событий A4 и A5:

$$\Phi_{neib_j}^{(i)} \geq \Psi_{A4} + \Theta_{A4}, \quad (4)$$

$$\Phi_{neib_j}^{(i)} \geq \Psi_{A5} + \Theta_{A5}. \quad (5)$$

Формулировка алгоритма выполнения передачи обслуживания HD-SOHP основана на концепции обучения с подкреплением (Reinforcement Learning, RL). Механизм RL выбран для того, чтобы справляться с динамическими изменениями среды радиосвязи, тем самым предоставляя БС необходимые возможности

самоорганизации для изменения параметров решения о хендовере. Из различных методов решения RL выбран метод MDP (Markov Decision Process, Марковский процесс принятия решений) поскольку он требует минимальных вычислений для выбора оптимального действия. HD-SOHP также учитывает то, что задержка выполнения хендовера приведет к ухудшению параметров его производительности, что напрямую влияет на качество обслуживания.

Для каждого пользовательского терминала, подключенного к соответствующей обслуживающей БС, алгоритм HD-SOHP выполнения определяет две концепции состояний. Первое состояние называется состоянием параметра решения о хендовере пользовательским терминалом, а второе определяется как состояние радиопередачи обслуживания пользовательского терминала.

Первое состояние основано на различных значениях НОМ (Handover Margin, Запас на передачу обслуживания) и ТТТ (Time To Trigger, Время срабатывания) в соответствии с (6) и (7).

Дискретные значения ТТТ определены в виде множества (6):

$$T = [t_{t1}, t_{t2}, \dots, t_{tM}], \quad (6)$$

где  $M$  – число параметров.

Коэффициент отказа в хендовере, для  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени, равен отношению неуспешных попыток хендовера к их общему числу (7):

$$h_i^{(k)} = \frac{\chi_i^{(k)}}{\eta_i^{(k)}}, \quad (7)$$

где  $\chi_i^{(k)}$  – коэффициент неуспешных попыток хендовера для  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени;

$\eta_i^{(k)}$  – коэффициент общего числа попыток хендовера для  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени.

Для оценки работоспособности предложенной модели использовалась следующая имитационная модель: 19 всенаправленных БС, равномерно распределенных в области сети. Обслуживающая БС окружена 18 соседними БС. Количество пользователей, подключающихся к БС составляет 5. Для каждого пользователя создано одно приложение для потоковой передачи видео со скоростью 1 Мбит/с. Время выполнения этого моделирования составляет 100 секунд и остается постоянным для каждого сценария. Все БС передают на полной мощности по нисходящей линии связи (полная загрузка). Использованы модели краткосрочного замирания, разброса задержек и профиля мощности-задержки из 3GPP, такие как Veh30 [2], т.е. скорость передвижения терминального оборудования 30 км/ч. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

Для «Случай 1» значение хендовера составляет 10 дБ и ТТТ – 5 миллисекунд, происходит резкое увеличение коэффициента отказа хендовера с 0,5% до 4,5%. Из-за высокого значения хендовера, для генерации событий передачи обслуживания требуется низкий RSRP обслуживающей БС и высокий RSRP соседней БС. Как только отчет об измерении получен обслуживающей БС, к тому времени, когда она завершает анализ обнаружения хендовера, для пользователей происходит сброс вызова из-за очень низкого RSRP обслуживающей БС. Это происходит задолго до того, как обслуживающая БС отправляет пользователям команду для организации хендовера.

Для «Случай 2» значение хендовера составляет 4,5 дБ и ТТТ – 160 миллисекунд соответственно, наблюдается медленный рост коэффициента отказов хэндовера с 0,5% до 1,2%. Из-за низкого уровня НОМ, события передачи обслуживания, которые будут генерироваться пользователями, происходят гораздо быстрее, по сравнению с первым сценарием.

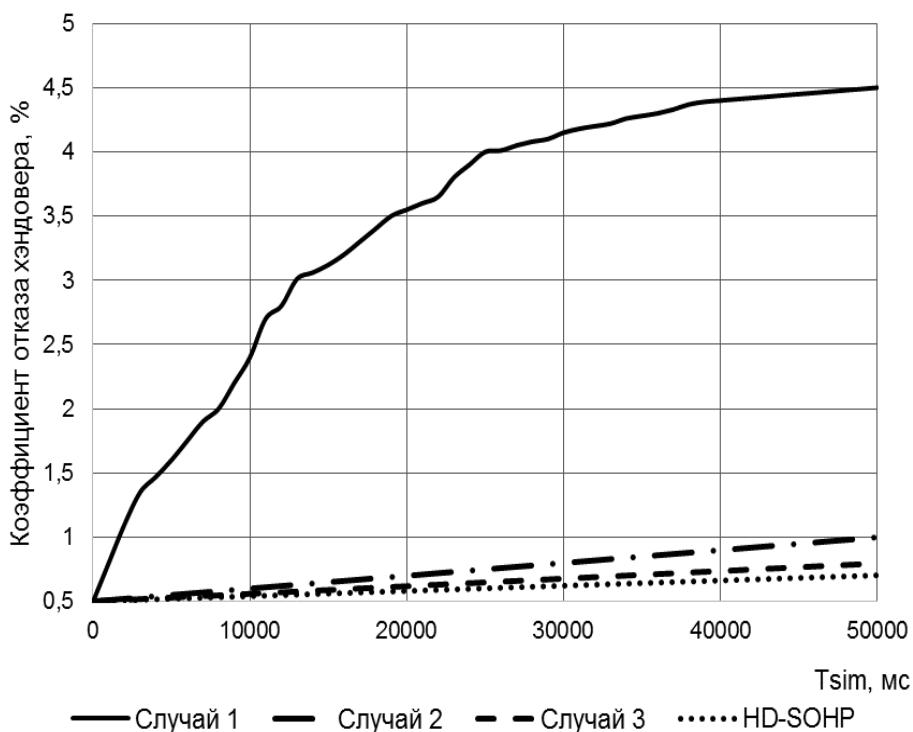


Рис. 1. Результаты имитационного моделирования для случая скорости передвижения терминального оборудования 30 км/ч

Так как ТТТ сохраняется на самом высоком значении, равном 160 мс, это замедляет передачу отчетов об измерениях от пользователя к обслуживающей БС. К тому времени пользователь получает команду на выполнение хендовера; RSRP обслуживающей БС слишком низок для поддержания сеанса, что приводит к сбросу вызова.

Для «Случай 3» значение хендовера составляет 0 дБ и ТТТ – 1 миллисекунду соответственно, наблюдается очень медленный рост коэффициента отказов хэндовера с 0,5% до 0,9%. Из-за нулевого значения хендовера, события будут быстрее генерироваться пользователями. Так как ТТТ поддерживается на самом низком значении, равном 1 мс, это ускоряет передачу отчетов об измерениях от пользователей к обслуживающей БС. Тем не менее, этот специфический для оператора сценарий статического параметра решения о передаче обслуживания не может поддерживать пользовательский сеанс. Этот сценарий вызывает слишком большой расход батареи на стороне пользователя и резко увеличивает использование вычислительных ресурсов (например, памяти, вычислительной нагрузки операционной системы, количества ядер, используемых для обработки и т. д.) обслуживающей оборудования БС.

И, наконец, предложенный алгоритм показывает, что коэффициент отказов хэндовера не только медленно возрастает, но и является минимальным, по сравнению с перечисленными случаями.

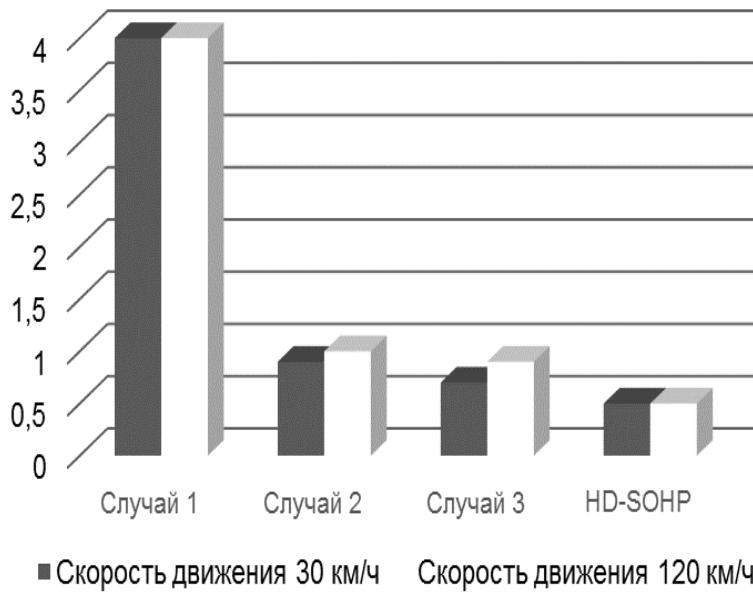


Рис. 2. Сравнительный анализ среднего коэффициента отказов хэндовера

Аналогичное моделирование произведено для случая передвижения терминального оборудования со скоростью 120 км/ч и на рисунке 2 приведена сравнительная гистограмма среднего коэффициента отказов хэндовера.

Так, для пользователя, со скоростью движения 30 км/ч улучшение достигается до 5,07 раз, а в случае увеличения скорости до 120 км/ч – в 4,96 раз.

**Планировщик на основе функций полезности.** Вторым составляющим компонентом предложенного метода является схема разработанного планировщика обслуживания восходящей линии на основе функций полезности (8).

$$W_i^{(k)} = \frac{B_i^{(k)}}{R_g}, \quad (8)$$

где  $B_i^{(k)}$  – средняя пропускная способность, выделяемая  $i$ -му пользователю в  $k$ -й момент времени;

$R_g$  – пропускная способность для гарантированного обслуживания.

Разработанный алгоритм использует функции полезности для расчета метрики планирования. Итак, концепция для определения метрики планирования обслуживания  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени, с учетом свойств функций полезности (9).

$$U_i(QoE^{(k)}) = 1 - e^{-\alpha QoE^{(k)}}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – постоянная сходимости полезности;

$QoE$  – функция качества использования.

Функция качества использования может быть определена, согласно (10):

$$QoE^{(k)} = \frac{Bd_i^{(k)}}{1 - Bd_i^{(k)}} + \frac{\tau_i^{(k)}}{\tau_{\max}}, \quad (10)$$

где  $Bd_i^{(k)}$  – дефицит пропускной способности  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени;

$\tau_i^{(k)}$  – задержка обработки планировщиком  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени;

$\tau_{\max}$  – максимально допустимая задержка для приложения или сервисного потока.

Дефицит пропускной способности  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени определяется, исходя из (11):

$$Bd_i^{(k)} = 1 - W_i^{(k)}. \quad (11)$$

Задержка обработки планировщиком  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени определяется, исходя из (12):

$$\tau_i^{(k)} = \tau_i^{(k)} - \tau_i^{(k+1)}. \quad (12)$$

Учитывая, что  $Z$  – множество пользователей, обслуживаемых БС,  $\{x_1, \dots, x_N\}$ , где  $N$  – общее количество пользователей, то в каждый момент времени вычисляются его веса пользователя и обновляются в множестве (13):

$$\Omega = \{U_1, \dots, U_N\}. \quad (13)$$

Вышеприведенное выражение касается определения веса в случае передачи пользователем нового пакета. Стоит помнить, что если БС не может декодировать пакет терминала, то она дает команду на повторную передачу. Для такого случая, выражение (13) изменяется следующим образом (14):

$$\Omega = \{U_1^{ret}, \dots, U_N^{ret}\}, \quad (14)$$

где  $U_i^{ret}$  – вес, определяющий повторную передачу от  $i$ -го пользователя в  $k$ -й момент времени.

Множество  $\Omega$  подразделяется на следующие подмножества:  $\Omega_{VoIP}$  – подмножество пользователей, использующих услугу VoIP, а  $\Omega_{Video}$  – подмножество пользователей, использующих услугу видеоприложений. Тогда составляется новое множество, отсортированных по убыванию значений для услуг VoIP и видеоприложений (15):

$$\dot{\Omega} = \{\dot{\Omega}_{VoIP}, \dot{\Omega}_{Video}\}. \quad (15)$$

Для  $k$ -го момента времени выбирается наибольший вес множества (15). Как только вес найден, то пользователю, которому он соответствует, предоставляются необходимые ресурсы.

Для оценки качества работы планировщика для каждого временного интервала определены следующие индикаторы производительности: средняя пропускная способность пользователя, средняя пропускная способность соты и коэффициент отброшенных пакетов. Как только пользователи очереди готовы к передаче данных, базовая пользовательская пропускная способность  $Bb_i^{(k+1)}$   $i$ -го пользователя в  $(k+1)$ -й момент планирования определяется как (16):

$$Bb_i^{(k+1)} = \frac{Q_i^{(k)}}{\Delta TTI}, \quad (16)$$

где  $Q_i^{(k)}$  – общее количество подтвержденных битов  $i$ -го пользователя до  $k$ -го момента планирования;

$\Delta TTI$  – параметр, характеризующий разницу между во времени между текущим временем планирования и временем начала передачи.

Максимальная средняя пропускная способность пользователя определяется согласно (17):

$$Bb_i^{(k+1)} = \max(R_g, Bb_i^{(k+1)}). \quad (17)$$

Выражения (16) и (17) используются для расчета пропускной способности пользователя с каждой новой передачей или повторной передачей от планировщика. Если конкретная пользовательская очередь не получает слот для планирования (незапланированный пользователь), планировщик уменьшает среднюю пропускную способность  $Bb_i^{(k)}$   $i$ -му пользователю в  $(k+1)$ -й момент планирования на 1% [3].

На основе показателя пропускной способности, оценивается мгновенная пропускная способность соты в  $k$ -й момент планирования, как (18):

$$TotC^{(k)} = \sum_{i=1}^M Bb_i^{(k)}. \quad (18)$$

После завершения моделирования планировщик, наконец, вычисляет среднюю пропускную способность соты. Она определяется как сумма мгновенных пропускных способностей соты для каждого TTI, относительно общей временной выборки полного моделирования (19):

$$TotC = \frac{\sum_{i=1}^T TotC^{(k)}}{T}. \quad (19)$$

Время на перепланирование является еще одним показателем, используемым для оценки производительности планировщика. Оно оценивается для  $i$ -го пользователя в  $(k)$ -й момент по (11). Среднее значение времени перепланирования, затрачиваемое на выборку всех пользователей за время моделирования  $T$  оценивается, исходя из (20):

$$tsh = \sum_{k=1}^T \left( \sum_{i=1}^N \frac{tsh_i^{(k)}}{N} \right) / T. \quad (20)$$

Для оценки эффективности разработанного планировщика проведено имитационное моделирование. Имитационная модель состоит из 19 равномерно распределенных и всенаправленных eNodeB (Evolved Node B, эволюционировавший узел B). Обслуживающий eNodeB окружен 18 соседними eNodeB. Количество пользователей, обслуживаемое eNodeB составляет 50, 75 и 100. Время симуляции составляет 100 с. Считаем, что мощность передачи каждой eNodeB максимальна. Частота несущей 2 ГГц. Системная пропускная способность 5 МГц и 20 МГц. Радиус покрытия соты составляет 1 км. Модель потерь на трассе описывается выражением (21).

$$L = 128,1 + 37,6 \cdot \lg(R), \quad (21)$$

где  $R$  – радиус соты.

Мощность передатчика eNodeB – 43 dBm; мощность передатчика пользователя терминала – 24 dBm. Пользователи мобильны и передвигаются со скоростью 30км/ч до границы соты и обратно.

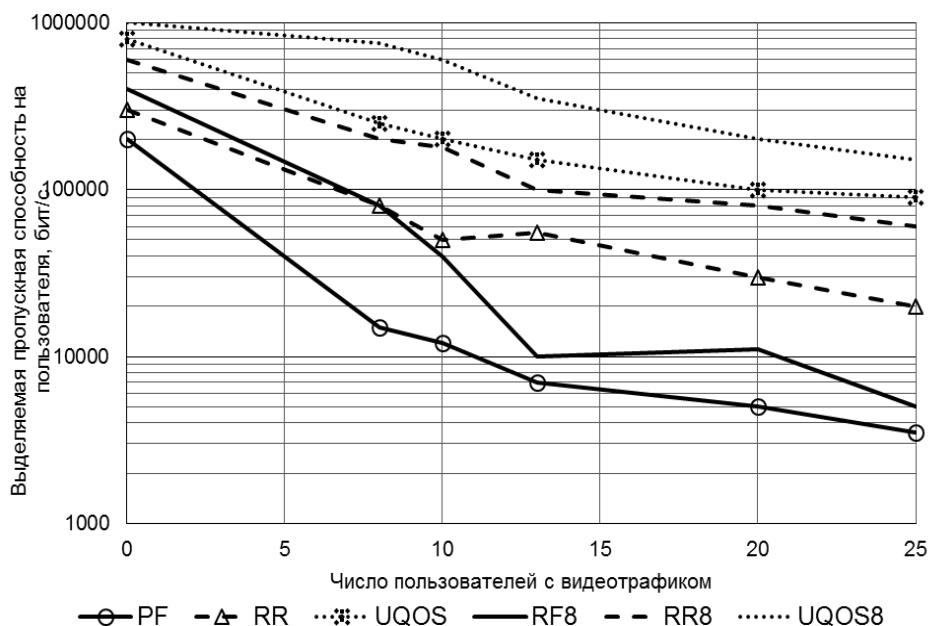


Рис. 3. Среднее значение выделяемой пропускной способности для пользователей видеотрафика

Исходя из представленных результатов, объем выделяемой пропускной способности пользователю с помощью традиционных алгоритмов планировщика RR (Round Robin, Справедливое распределение) значительно увеличивается при применении алгоритма распределения ресурсов (Utility based Quality of Service Uplink Scheduler, UQOS). В сценарии для 50 пользователей соты механизм UQUS обеспечивает минимальный выигрыш в 4 раза по пропускной способности для видеотрафика и в 2 раза для VoIP-трафика по сравнению с планировщиками RR и PF (Proportionate Fairness, Пропорциональное справедливое распределение).

**Выводы.** Предложенный метод обеспечения параметров качества обслуживания в LTE-сетях повышает эффективность использования ресурсов в 2 раза, при снижении величины задержки на перепланирование на 70 %, по сравнению с планировщиком справедливого обслуживания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anand, S. Downlink Power Allocation With Pricing in CDMA / S. Anand, A. Chockalingam // In 2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. – Vol. 3 – P. 1865–1869.
2. Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework / Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia [et. al] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2011. – Vol. 60, Is. 2. – P. 498–513.
3. Jalali, A. Data throughput of cdma-hdr a high efficiency-high data rate personal communication wireless systems / A. Jalali, R. Padovani, R. Pankaj // IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2000 (VTC2000-Spring). – Tokyo, 2000. – Vol. 2. – P. 1854–1858.

Поступила в редакцию 25.08.2022 г., рекомендована к печати 12.09.2022 г.

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PROVIDING QUALITY OF SERVICE PARAMETERS IN  
LTE NETWORKS BASED ON THE ALGORITHM OF THE UPLINK SCHEDULER**

**Lozinskaia V.N., Molokovskii I.A., Iaremko I.N.**

In this paper, a theoretical substantiation and simulation of the proposed method for providing quality of service parameters in LTE networks is carried out. This approach allows you to increase the efficiency of resource use while reducing the amount of delay for rescheduling.

**Keywords:** quality of service parameters, LTE network, resource efficiency, rescheduling delay.

**Лозинская Виктория Николаевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
Email: lvn\_04@mail.ru

**Lozinskaia Viktoria Nikolaevna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University,

Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Молоковский Игорь Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
Email: mia.donntu@mail.ru

**Molokovskii Igor Alekseevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University,

Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Яремко Игорь Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: yin\_work@mail.ru

**Iaremko Igor Nikolaevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University,

Russian Federation, DPR, Donetsk.

УДК 621.354.76

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМОДОВОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

© 2022 Алексейчик Л.В., Курушин А.А.

---

Проведено моделирование цилиндрического резонатора (ЦР), возбужденного на одном из высших  $H$ -типов колебаний, обладающих сверхвысокими значениями собственной добротности, к которым относятся  $H_{011}$ ,  $H_{113}$  и  $H_{221}$  магнитные типы колебаний (моды). Основное внимание уделено  $H_{221}$  моде колебаний, для которой достигается максимально возможные значения собственной добротности ЦР в миллиметровом диапазоне длин волн. Принято, что внутренние стенки ЦР выполнены из слоев серебра, а его полость заполнена вакуумом. Целью работы являлось установление геометрии ЦР на заданную резонансную частоту, обеспечивающей максимальную отстройку рабочей моды  $H_{221}$  от соседних частот окружающих его высших мод, а также получение картин распределения электромагнитного поля и частотных характеристик ЦР при его возбуждении сторонним источником в виде прямоугольного металлического волновода. Численное моделирование задачи проведено с помощью программы CST Microwave Studio

**Ключевые слова:** многомодовые металлические резонаторы, высшие моды резонатора, миллиметровый диапазон частот, моделирование в CST Microwave Studio.

---

**Введение.** В связи с современной тенденцией освоения миллиметрового диапазона длин волн возникла потребность в создании высокодобротных резонаторов и на их основе фильтров, мультиплексеров и других пассивных СВЧ устройств повышенной мощности для средств мобильной и космической связи [1, 2]. Применение металлических полых резонаторов, работающих на низших модах колебаний не может удовлетворить современным техническим требованиям, в связи с заметным ростом потерь таких резонаторов с увеличением резонансной частоты. Несмотря на то, что многомодовые режимы металлических резонаторов были хорошо известны ранее, их использование не получило широкого применения по сравнению с одномодовыми резонаторами, работающими на низших модах сантиметрового диапазона длин волн и имеющими достаточно большую отстройку по частоте от высших мод. Со временем предложений об использовании многомодовых резонаторов для фильтров, был описан ряд конструкций фильтров, использующих прямоугольные и цилиндрические двух- и трех-модовые резонаторы [3, 4]. Применение резонаторов на высших модах требует выделение рабочей моды из множества других высших мод и обеспечение требуемого диапазона перестройки её резонансной частоты. Чтобы удовлетворить современным требованиям к конструкциям фильтров мм-диапазона для систем мобильной и космической связи необходимо использование резонаторов с высокими значениями добротности и температурной стабильности при приемлемых габаритах и весе. Так в работе [5] впервые было предложено использование  $H_{221}$  моды металлического цилиндрического сверхдобротного резонатора повышенной мощности миллиметрового диапазона, обеспечивающего эти условия и реализацию фильтра и диплексеров на их основе. Представляют также практический интерес известные многомодовые диэлектрические резонаторы и фильтры на их основе [6].

В настоящей работе проведено численное моделирование  $H_{221}$  - моды цилиндрического резонатора (ЦР) повышенной собственной добротности на частотах порядка 17 ГГц, 21 ГГц и 30 ГГц с целью установления картин распределения векторов

электромагнитного поля и определения размеров резонатора, обеспечивающих максимальную отстройку его резонансной частоты от соседних высших мод колебаний. Рассмотрен случай возбуждения такого резонатора отрезком прямоугольного волновода и его АЧХ в полосе частот, а также реализация двухмодового фильтра.

**Основная часть.** На рис. 1 представлена диаграмма распределения мод ЦР в диапазоне частот в зависимости от L- длины резонатора при заданном значением его R- радиуса для варианта ЦР с исходными данными: радиус R = 16 мм, длина L, которая изменялась в пределах от 15 до 20 мм. Оптимальная длина резонатора составила 18 мм, при этом резонансная частота моды  $H_{221}$  равна 21,6678 ГГц, частотная полоса отстройки которой от ближайших высших мод составила не менее 1,5 ГГц.

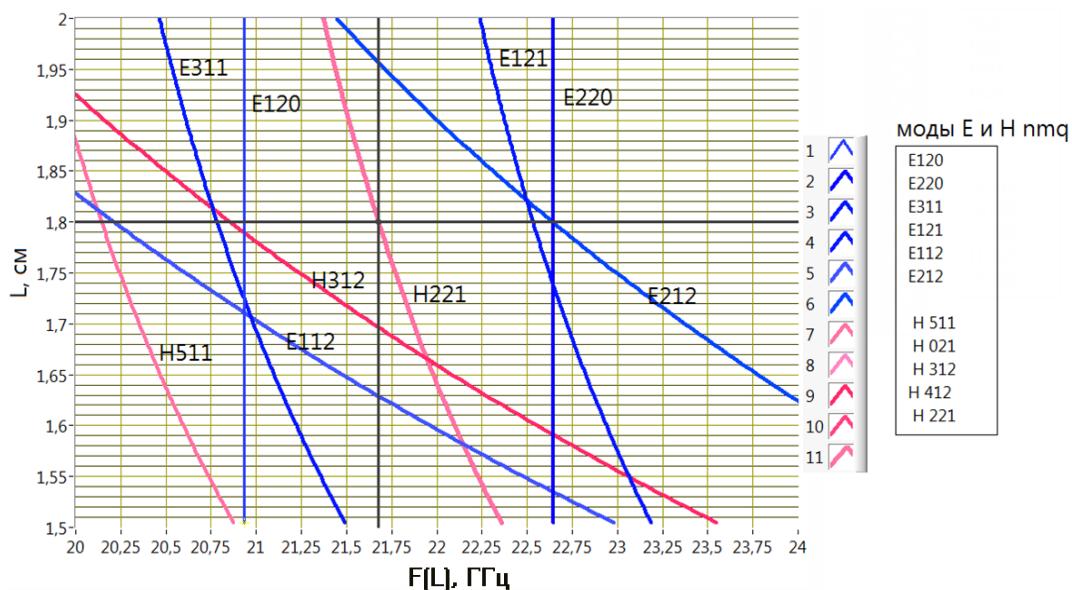


Рис. 1. Распределение мод ЦР в зависимости от длины L цилиндрического резонатора

Из данных рис. 1. следует, что рабочая область частот моды  $H_{221}$  практически устанавливается достаточно просто, она расположена между электрическими модами  $E_{120}$  и  $E_{220}$ , резонансные частоты которых не зависят от длины ЦР. Следует отметить некоторую некорректность в диаграмме мод, допущенную авторами в работе [4], в которой резонансные частоты отмеченных мод  $E_{120}$  и  $E_{220}$  зависят от длины резонатора, а также присутствуют моды с ростом резонансной частоты при увеличении длины резонатора. Оптимальные размеры ЦР на резонансные частоты 17 и 21 ГГц были определены из данных аналогичных диаграмм высших мод.

Численное моделирование ЦР с размерами R = 20 мм, H = 20 мм, работающего на моде  $H_{221}$ , позволило получить картины распределения электрического (рис.2,3) и магнитного поля, а также резонансную частоту и собственную добротность резонатора, внутренние стенки которого покрыты серебром, имеющим проводимость  $\sigma = 63 \cdot 10^6$  См/м.

На рис. 2, 3 приведены картины распределения модулей электрического и магнитного полей в различных плоскостях сечения двухмодового ЦР. Электромагнитные поля в ЦР рассчитаны, используя систему автоматизированного проектирования CST MWS.

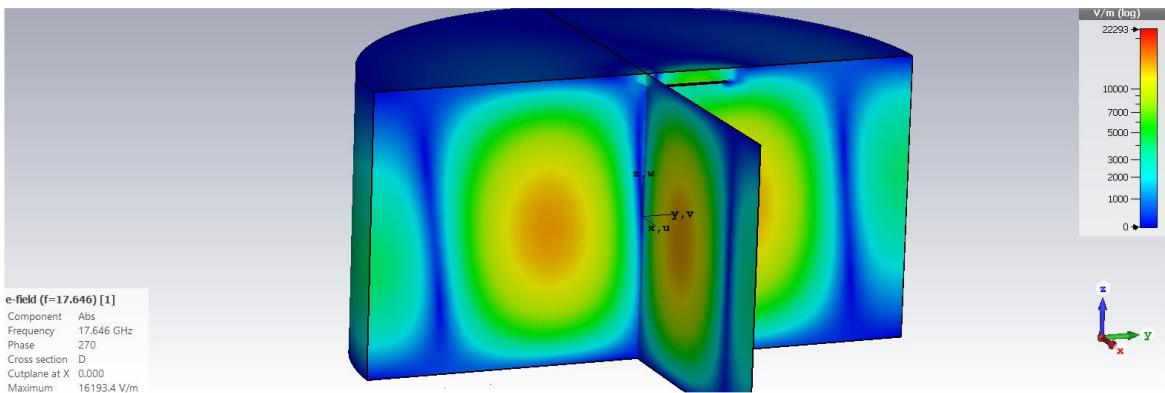


Рис. 2. Распределение модуля Е в поперечном сечении ЦР при возбуждении в ЦР моды  $H_{221}$

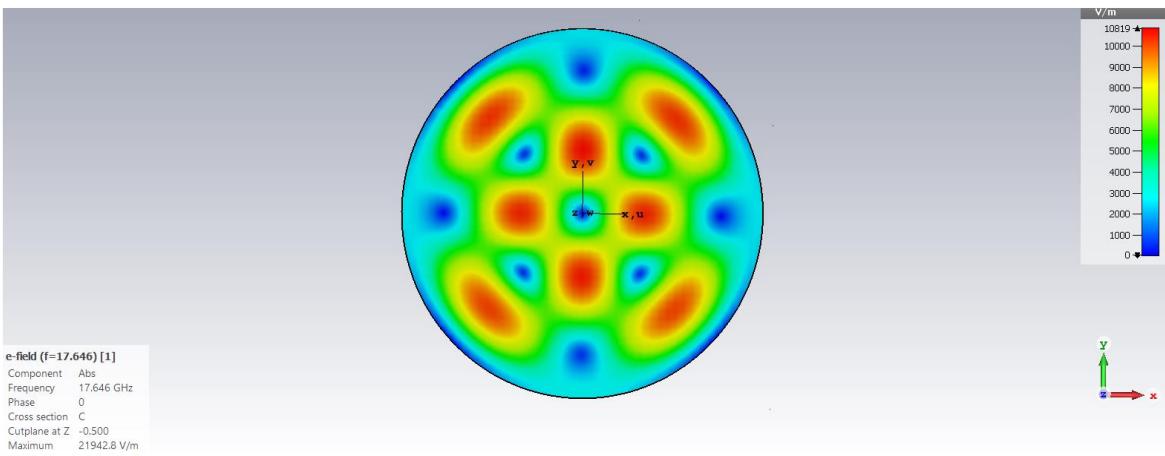


Рис. 3. Распределение модуля Е в сечении, параллельном основанию ЦР при возбуждении в ЦР моды  $H_{221}$

Из представленных картин распределения модулей векторов электромагнитного поля следует, что поле моды  $H_{221}$  имеет 4-х лепестковый вид и концентрируется в центральной области резонатора, что значительно снижает величину поверхностных токов на его металлических стенках, в результате чего достигается очень высокая добротность. Вырожденная вторая мода ортогональна первой моде и сдвинута по направлению «лепестков» векторов электрического поля на  $45^\circ$ , что следует учитывать при возбуждении двухмодового ЦР входным и выходным портами. На рис. 4 приведена таблица расчета собственной добротности двухмодового ЦР, откуда следует значение собственной добротности (Q фактора), равного 34652, что значительно превышает Q-фактор известных мод цилиндрических резонаторов той же резонансной частоты. Резонансные частоты для обоих мод равны 17646 ГГц. В таблице 1 приведены параметры ЦР в широком диапазоне частот для различных конфигураций ЦР. Видно, что значение добротности ЦР на моде  $H_{221}$  выше 20000 сохраняется для частот выше 40 ГГц.

Таблица 1. Параметры цилиндрического резонатора

Частота $F_0$ , ГГц	Добротность $Q_0$	Радиус $R$ , мм	Высота $H$ , мм
4,33	63750	80	90
12,36	36850	28	32
21,57	31000	16	18
30,41	26000	11	17
42,28	20400	8	11

Расчет собственной добротности Qо осуществлялся на стадии постпроцессорной обработки данных, как показано на рис. 4.

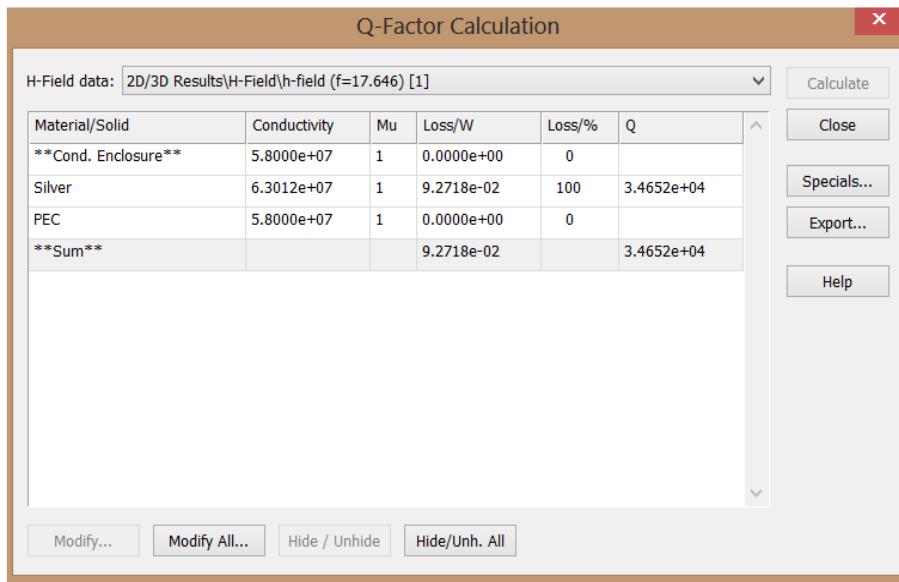


Рис. 4. Расчет добротности ЦР

Для другого резонатора (вариант 2) размеры ЦР которого равны R = 16 мм, H = 18 мм, материал покрытия серебро ( $\sigma = 63 \cdot 10^6$  См/м), значения собственной добротности (Q-фактор = 31500), а резонансная частота 20,550 ГГц, что показывает, что резонатор с меньшими размерами имеет меньшую добротность. Для других мод добротность уменьшается до 5000-15000, что зависит от распределения токов на поверхности ЦР при возбуждении данного типа волн. Возбуждение ЦР проводилось отрезком прямоугольного волновода сечение 11 x 5 мм, подключенного к пластине основания ЦР, как показано на рис. 5.

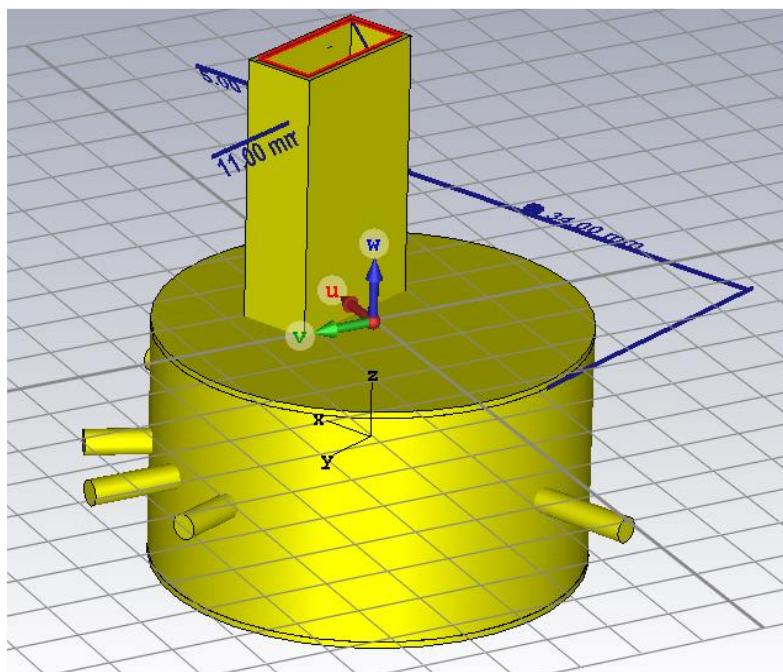


Рис. 5. Конструкция ЦР с волноводным портом

Частотная характеристика коэффициента отражения  $S_{11}$  волноводного порта представлена на рис. 6, откуда получено расчетное значение нагруженной добротности ЦР, равное 20550, что соответствует параметру внешней связи, равному отношению собственной добротности (рис. 6) к нагруженной добротности как  $(31500/20550)=1,53$ .

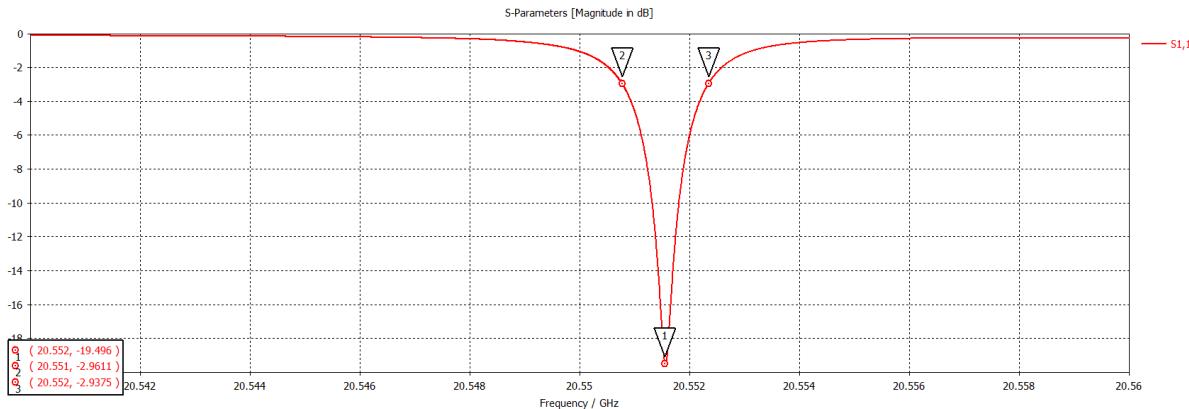


Рис. 6. АЧХ коэффициента  $S_{11}$  волноводного порта ЦР

В широком диапазоне частот от 10 до 30 ГГц имеем следующие распределения мощности, теряемые в резонаторе (Power Accepted), а также выходные мощности (Power Outgoing), отраженные ко входу в однопортовом резонаторе (рис. 7).

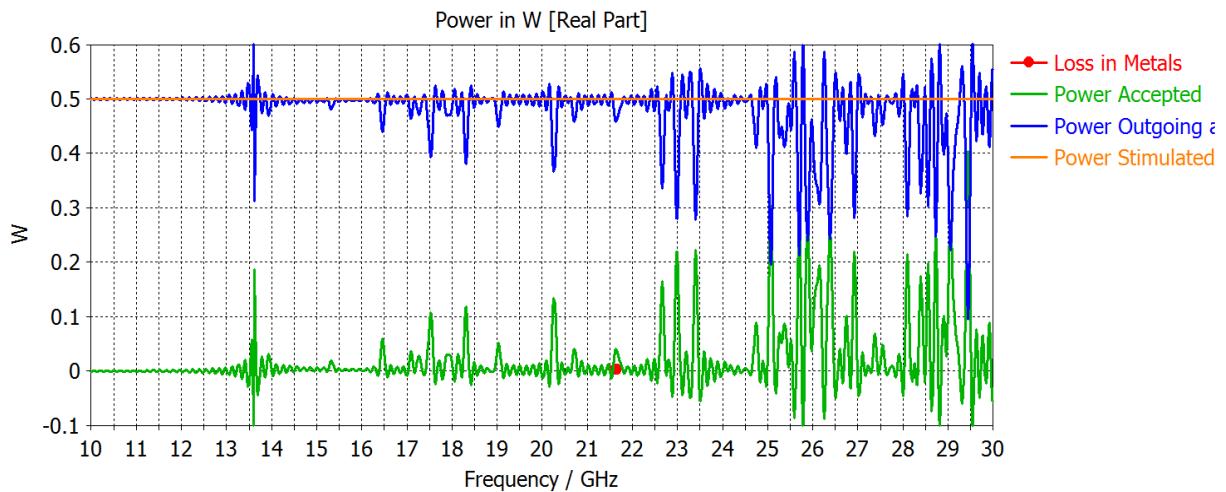


Рис. 7. Мощность возбуждения гармоник ЦР в полосе частот

Из приведенной картины распределения мощности возбуждения гармоник в широкой полосе частот видно, что рабочая область частот (при отстройке моды  $H_{221}$  от паразитных мод) ЦР лежит в пределах примерно от 19,5 до 22,5 ГГц, что согласуется с данными диаграммы мод, построенной для данного ЦР (рис. 1).

Практическое использование двухмодового ЦР покажем на примере моделирования волноводного транзисторного СВЧ усилителя, активный элемент которого монтируется в корпусе ЦР (рис. 8). Активный элемент включается между двумя внутренними портами (порты 3 и 4), рис. 9. Порт 3 возбуждает входную моду. Выходной порт 2 принимает мощность электромагнитной волны моды  $H_{221}$ , смещенной на  $45^\circ$ .

Благодаря разнесению картины мод в пространстве и входного «1» и выходного «2» портов возбуждения резонатора, появляется возможность увеличить устойчивость усилителя благодаря развязке связи между модами.

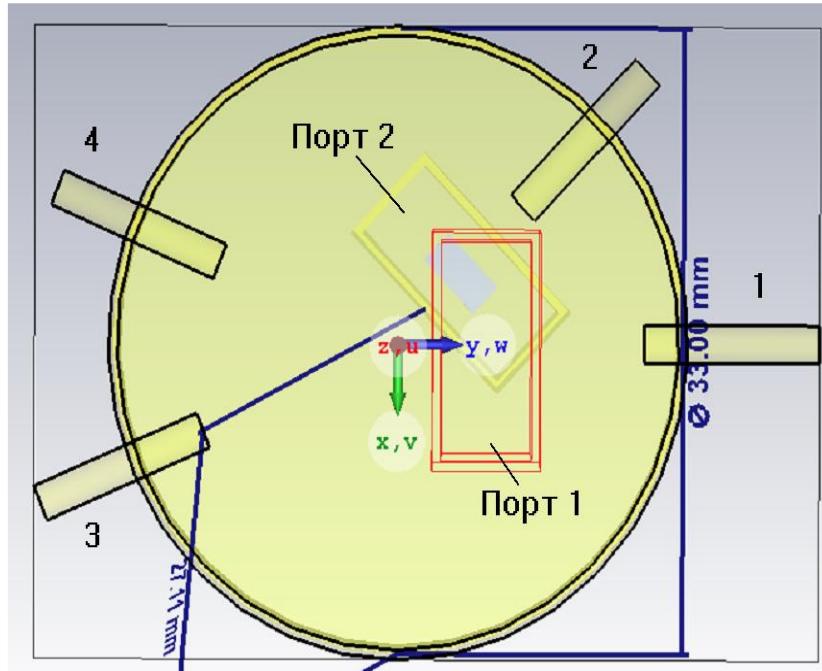


Рис. 8. Входной и выходной волноводы, разнесенные на  $45^{\circ}$  для возбуждения мод  $H_{221}$

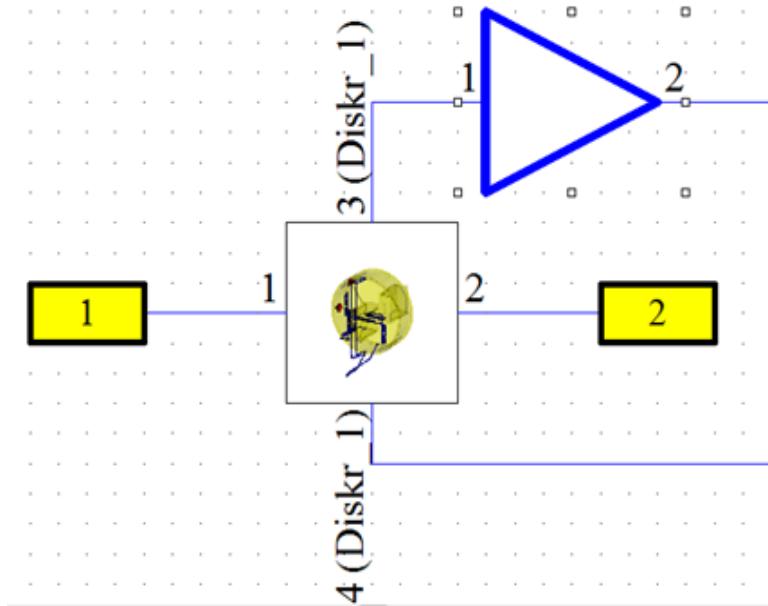


Рис. 9. Включение усиливающей схемы в структуру ЦР между двумя внутренними портами

Картина поля (рис. 10) с учетом усиления тока на выходе усиливающей схемы рассчитывается методом косимуляции, реализованной в CST DC [7]. Расчет характеристик передачи выполняется на уровне схемы, а связь в пространстве цилиндрического резонатора выполняется методом конечных разностей во временной области.

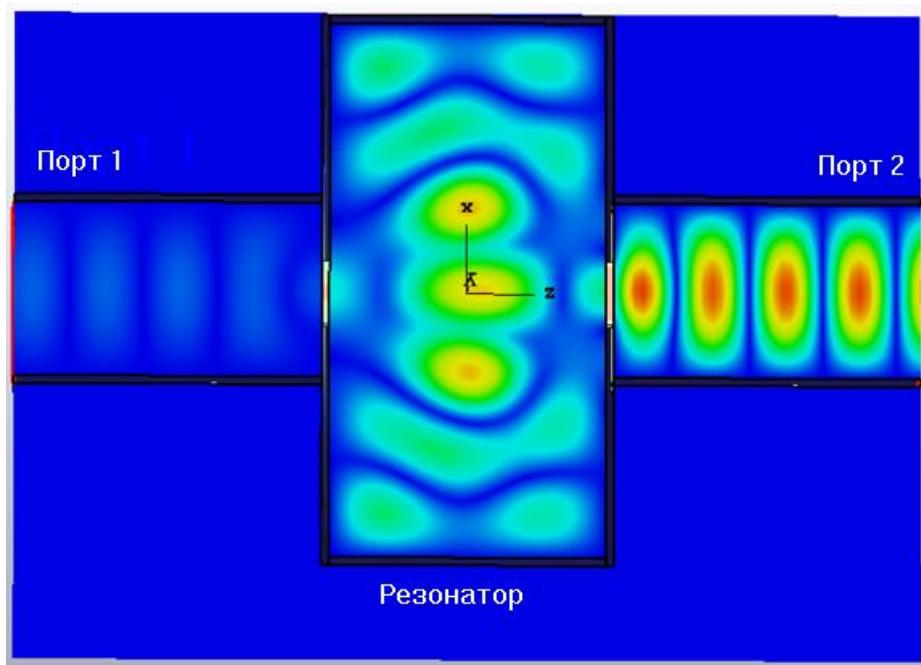


Рис. 10. Ближнее поле в сечении цилиндрического резонатора с включенным активным элементом между портами

Гибридное моделирование электродинамических систем, включающих дискретные компоненты в резонаторы, позволяют создавать высокодобротные многомодовые фильтры, активные антенны и антенны-фильтры [7].

**Выводы.** Моделирование многомодового ЦР с модой  $H_{21}$  показывает необходимость высоко технологичного подхода при конструировании микроволновых устройств на таких резонаторах, связанного с обеспечением требуемых параметров внешней связи и взаимной связи между вырожденными колебаниями двух ортогональных мод и параметрами взаимной связи между двухмодовыми резонаторами. Ввиду весьма высокой собственной добротности таких ЦР и ограниченной полосы частот отстройки от других высших мод практическое применение двухмодовых цилиндрических резонаторов на  $H_{21}$  моде является перспективным для создания узкололосных фильтров миллиметрового диапазона с полосой пропускания порядка 30-50 МГц, широко использующихся в средствах космической связи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Земляков, В. В. Волноводные селективные устройства / В. В. Земляков, Г. Ф. Заргано. – Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2019. – 310 с.
2. СВЧ-фильтры и мультиплексоры для систем космической связи / М. П. Апин, С. И. Боков, Н. А. Бушуев [и др.]. – Москва : Радиотехника, 2017. – 256 с.
3. Лин, В. СВЧ-фильтры с одним резонатором, возбуждаемые более чем одним режимом / В. Лин // Прикладная физика. – 1951– № 22 (8). – С. 989-1001.
4. Williams, A. E. Dual-Mode Canonical Waveguide Filters / A. E. Williams, A. E. Atia // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1977. – V. 25. – №12. – P. 1021-1026. – DOI: 10.1109/TMTT.1977.1129267.
5. Yassini, B. Ka-Band Dual-Mode Super Q Filters and Multiplexers / B. Yassini, M. Yu // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2015. – V. 63. – №10. – P. 3391-3397. – DOI: 10.1109/TMTT.2015.2462822.

6. Cameron, R. J. Asymmetric Realisations for Dual-Mode Bandpass Filters / R. J. Cameron, J. D. Rhodes // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1981. – V. 29. – № 1. – P. 51-58. – DOI: 10.1109/TMTT.1981.1130286.
7. Алексейчик, Л. В. Комплексное моделирование в программе CST SUITE / Л. В. Алексейчик, А. А Курушин. – Москва : Солон-Пресс, 2022. – 276 с.

*Поступила в редакцию 14.09.2022 г., рекомендована к печати 27.09.2022 г.*

## **MODELING OF A MULTIMODE CYLINDRICAL RESONATOR OF THE MILLIMETER WAVE RANGE**

**Alekseychik L.V., Kurushin A.A.**

Multi-mode metal cylindrical resonator (CR) excited at one of higher  $H$ -types of oscillations, having higher values of natural Q-factor, which include  $H_{011}$ ,  $H_{113}$  and  $H_{221}$  magnetic types of oscillations (modes), is simulated. The main attention is paid to the  $H_{221}$  mode of oscillations, for which the maximum possible values of the natural Q-factor of the CR in the millimeter wavelength range are achieved. It is accepted that inner walls of CR are made of layers of silver, and its cavity is filled with vacuum. The purpose of the work was to establish the geometry of the CR at a given resonant frequency, which ensures maximum tuning of the working mode  $H_{221}$  from the neighboring frequencies of the higher modes surrounding it, as well as to obtain patterns of the distribution of the electromagnetic field and the frequency characteristics of the CR when excited by a port source in the form of a rectangular metal waveguide. Numerical modeling of the task was carried out using the CST Microwave Studio.

**Keywords:** multi-mode ring resonators, higher resonator modes, millimeter frequency band, modeling in CST Studio.

**Алексейчик Леонард Валентинович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории цепей ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», Российской Федерации, г. Москва.  
E-mail: alekseychik@yandex.ru

**Alekseichik Leonard Valentinovich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Circuit Theory of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

**Курушин Александр Александрович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», Российской Федерации, г. Москва.  
E-mail: kurushin@mail.ru

**Kurushin Aleksandr Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Radio Technical Devices and Antenna Systems of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

И Н Ф О Р М А Ц И О Н Н Ы Е Т Е Х Н О Л О Г И И  
И Т Е Л Е К О М М У Н И К А Ц И И

УДК 536.7:004.942

ОБОСНОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИКИ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА  
МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2022 *Аверин Г.В., Звягинцева А.В.*

Одна из наиболее важных особенностей статики и динамики идеального газа состоит в том, что его состояния и термодинамические процессы их изменения являются равновозможными, вторая особенность – все положения и модели могут быть представлены геометрическими объектами в трехмерном пространстве. Методами статистического моделирования и дифференциальной геометрии теоретически обоснованы основные положения и законы идеального газа: уравнение Клапейрона, уравнение Майера, принцип существования энтропии, закон сохранения энергии и т.д. Получены новые соотношения и расчетные зависимости. Изложено несколько идей, направленных на дальнейшее развитие классической термодинамики.

**Ключевые слова:** термодинамика идеального газа, методы статистического моделирования и дифференциальной геометрии, законы и соотношения, вычислительный эксперимент.

**Введение.** Большое значение в термодинамике имеет понятие идеального газа, который характеризуется исключительно простой структурой. Идеальный газ отличается низкой плотностью вещества. Многие простые газы (водород, гелий, кислород, азот, неон и т.д.) ведут себя как идеальный газ, т.е. строго подчиняются уравнению Клапейрона. Законы идеального газа описываются математическими моделями, которые характеризуют состояния и процессы изменения состояний простых газов в термодинамических процессах.

Основные положения термодинамики идеального газа установлены экспериментальным путем, все эмпирические зависимости определяются двумя-тремя параметрами, что дает возможность создавать модели в трехмерном пространстве. Это позволяет наглядно представить многие положения в виде геометрических объектов и соотношений, что существенно упрощает процесс моделирования.

Исторически термодинамика идеального газа развивалась преимущественно феноменологическим путем от эксперимента к теории. Однако современные методы и средства статистического моделирования и дифференциальной геометрии позволяют в пространстве состояний идеального газа оперировать с множеством модельных состояний и термодинамических процессов и на основе анализа данных устанавливать теоретические закономерности. Полученные закономерности, как и принято при моделировании, подлежат сопоставлению с экспериментальными данными и зависимостями.

Целью статьи является теоретическое обоснование основных положений и законов идеального газа методами статистического моделирования и дифференциальной геометрии. Это позволяет предложить систему изложения термодинамических основ с использованием вероятностных и геометрических моделей.

**Постановка задачи.** Зададимся следующим проблемным вопросом: можно ли в термодинамике идеального газа получить уравнение Клапейрона, закон сохранения энергии и принцип существования энтропии теоретическим путем?

Во всех существующих системах изложения термодинамики применяется один исходный принцип, которыйложен в основание всех последующих выводов. Как справедливо отметил А.А. Гухман, вся система термодинамики основывается на всеобщем положении – незыблемости термодинамической формы уравнения закона сохранения и превращения энергии [1]. Данное уравнение установлено опытным путем и является фундаментальной закономерностью, с использованием которой формируется вся логическая целостность термодинамики.

Однако одна из наиболее важных особенностей статики и динамики идеального газа состоит в том, что его состояния и термодинамические процессы их изменения являются равновозможными. Исходя из этого, можно применить метод статистического моделирования для получения законов идеального газа теоретическим, а не экспериментальным путем. Вторая особенность состоит в том, что все положения и модели в этой области могут быть представлены в трехмерном пространстве геометрическими объектами с возможностью расчета всех их параметров.

Таким образом, методами статистического моделирования и дифференциальной геометрии требуется установить и обосновать:

- уравнение Клапейрона, определяющее в качестве уравнения состояния связь между основными параметрами идеального газа, а также другие соотношения;
- уравнение сохранения энергии в форме первого закона термодинамики;
- принцип существования энтропии для идеального газа и зависимости для ее определения;
- новые соотношения, имеющие большое значение.

**Уравнение состояния идеального газа.** Используя метод Монте-Карло, проведем следующий простой и легко воспроизводимый статистический эксперимент. Предположим, что состояние системы характеризуется двумя измеряемыми и независимыми параметрами  $x$  и  $y$ . В наблюдаемой области определения этих переменных  $E^2(0 \leq x \leq x_{\max}; 0 \leq y \leq y_{\max})$  параметр  $x$  изменяется от нуля до  $x_{\max}$ , а параметр  $y$  – от нуля до  $y_{\max}$ .

Известно [2], что вероятность попадания случайной точки в прямоугольник со сторонами, параллельными осям координат  $Ox$  и  $Oy$  (рис. 1, а), у которого правая вершина располагается в точке  $A(x, y)$ , равна (1):

$$\rho = P(0 \leq X \leq x; 0 \leq Y \leq y) = [F(x, y) - F(0, y)] - [F(x, 0) - F(0, 0)], \quad (1)$$

где  $F(x, y) = F_1(x)F_2(y)$  – функция распределения двумерной случайной величины для независимых случайных величин  $x$  и  $y$ .

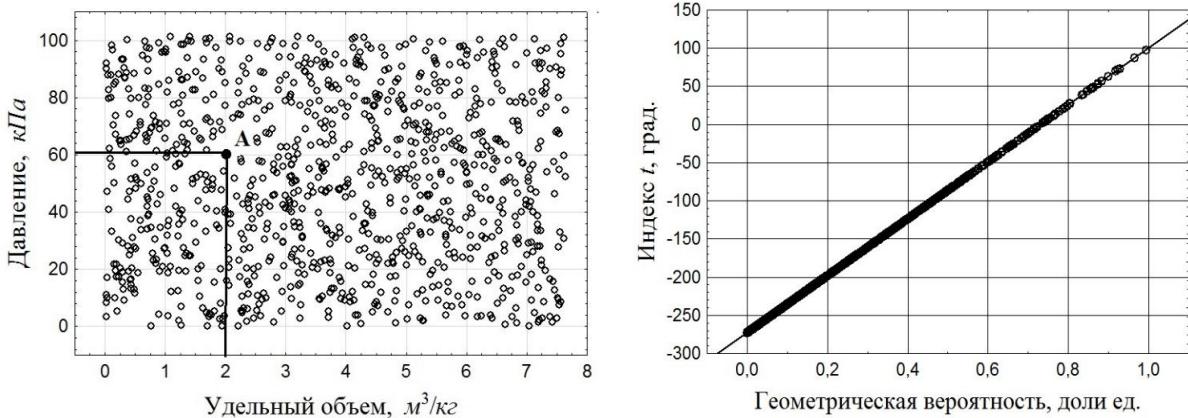
Из теории вероятностей следует, что если на плоскости дана равномерно распределенная двумерная случайная величина, то в этом случае применимо геометрическое определение вероятности. При этом вероятность попадания случайной точки в прямоугольник определяют в виде отношения площади прямоугольника, образованного координатными линиями  $x$  и  $y$  к точке  $A(x, y)$ , к площади всей прямоугольной области  $E^2$  [2].

Предположим, что координаты точки  $A(x, y)$  в процессе проведения статистических экспериментов на плоскости  $xOy$  в области  $E^2$  (рис. 1, а) могут быть выбраны на отрезках  $[0, x_{\max}]$  и  $[0, y_{\max}]$  каждый раз абсолютно случайно с учетом равномерного распределения независимых величин  $x$  и  $y$ . Определим вероятность расположения точки  $A(x, y)$  как:

$$\rho = 0 \text{ при } 0 \leq x \text{ или } y \leq 0;$$

$$\rho = \frac{xy}{x_{\max} y_{\max}} \text{ при } 0 < x \leq x_{\max} \text{ и } 0 < y \leq y_{\max}; \quad (2)$$

$$\rho = 1 \text{ при } x > x_{\max} \text{ и } y > y_{\max}.$$



а) диаграмма рассеивания физических свойств гелия при равномерном распределении данных (число статистических экспериментов – 1000)

б) зависимость индекса  $t$  согласно (3) от геометрической вероятности  $\rho$ , которая определена в соответствии с (2)

Рис. 1. Результаты статистического моделирования

Выберем на плоскости в области  $E^2$  некоторую опорную точку  $A_0(x_0, y_0)$ , для которой  $\rho = \rho_0$ , и проведем линейное шкалирование геометрической вероятности. Для этого точке  $A_0(x_0, y_0)$  присвоим значение, равное, например, ноль (градусов, пунктов или баллов), а точке  $A_1(x_{\max}, y_{\max})$  – значение, равное 100 (градусов, пунктов или баллов).

Построим линейную шкалу интервалов в виде индекса  $t$  [3]:

$$t = 100 \frac{\rho - \rho_0}{1 - \rho_0} = 100 \frac{(xy)_t - x_0 y_0}{x_{\max} y_{\max} - x_0 y_0}. \quad (3)$$

Далее методами регрессии будем устанавливать связь между геометрической вероятностью  $\rho$  и индексом  $t$ .

После пояснения методики статистического моделирования проведем вычислительный эксперимент применительно к имеющимся физическим данным. Предположим, что параметр  $x$  – это удельный объем газа  $\nu$ , а параметр  $y$  – это

давление газа  $p$ . Возьмем всего две опытные точки для произвольного газа, например, гелия. Известно, что при давлении среды, равном  $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ , и физических условиях, когда вода переходит в лед, удельный объем гелия равен  $v_0 = 5,59910 \text{ м}^3/\text{кг}$ . При том же давлении и физических условиях, когда вода кипит, удельный объем гелия равен  $v_{100} = 7,64893 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Будем считать состоянием газа некое событие, для которого пары значений величин  $v$  и  $p$  выбраны случайно. Генерируя равномерно распределенным генератором случайных чисел значение удельного объема  $v$  от нуля до  $v_{100}$  и значение давления  $p$  от нуля до  $p_0$ , получим для области  $E^2$  диаграмму рассеивания параметров свойств гелия (рис. 1, а).

Статистическая обработка этих вычислительных экспериментов дает для зависимости индекса  $t$  от величины вероятности  $\rho$  следующую линейную зависимость для гелия (рис. 1, б):

$$t = a + b\rho = -273,1496 + 373,1496\rho. \quad (4)$$

В случае, если взять известные опытные данные для водорода ( $v_0 = 11,12720 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $v_{100} = 15,20087 \text{ м}^3/\text{кг}$ ), то уравнение (4) будет получено в виде:  $t = -273,1493 + 373,1493\rho$ .

Аналогичным образом найдено, для кислорода:  $t = -273,1492 + 373,1492\rho$ ; для азота:  $t = -273,1527 + 373,1527\rho$ ; для неона:  $t = -273,1519 + 373,1519\rho$ .

Введем с учетом (4) понятие абсолютного индекса  $T = T_0 + t$ , где  $T_0 = -a$ , тогда имеем простую линейную связь этого индекса с геометрической вероятностью в виде  $T = b\rho$ . Можно показать, что коэффициент  $T_0$  связан с геометрической вероятностью состояния в опорной точке  $A_0$  и равен  $T_0 = 100\rho_0/(1-\rho_0) = 273,1496$ .

Легко также показать, что константы  $a$  и  $b$  линейного уравнения (4) практически не зависят от выбора опорной точки  $A_0$  на прямой линии  $p_0 = 101325 \text{ Pa}$ , т.е. не зависят от значения удельного объема  $v_0$ . Главное, чтобы на этой прямой выполнялось условие  $\rho_0 = (v_0/v_{100}) = 0,732011$ , которое определяется опытными данными нагревания идеальных газов при невысоких давлениях. Таким образом, полученные результаты носят универсальный характер и могут не привязываться к физическим свойствам конкретных газов. Например, идеального газа с параметрами ( $v_0 = 25,00 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $v_{100} = 34,1525 \text{ м}^3/\text{кг}$ ) при давлении  $p = p_0$  в природе не существует, тем не менее, для этого случая уравнение (4) можно получить в виде:  $t = -273,1494 + 273,1494\rho$ .

Таким образом, на основе статистических экспериментов найдено значение абсолютного нуля, равное по шкале  $t$  значению  $t_z = -273,1496$  град, при этом не использованы опытные данные термометрии за исключением данных о значениях давления и удельного объема в опорных точках. Из приведенных результатов видны явные аналогии с процессами построения шкал температур – шкалой Цельсия  $t$  и шкалой Кельвина  $T$ . Все описанное выше позволяет сделать следующие выводы:

- проводя измерения температур по шкале Кельвина, мы тем самым определяем внутри шкалы  $0 < T \leq 373,15$  геометрическую вероятность состояния некой абстрактной термодинамической системы, которую называют идеальной. Вне шкалы

обычно проводится распространение функции температуры на всю числовую ось  $T(0, +\infty)$ , т.к. известно, что любую непрерывную функцию, имеющую непрерывные производные в замкнутой области, можно распространить на всю числовую ось [4]. Основной особенностью идеальной термодинамической системы является равновозможный выбор значений параметров газа при низких давлениях;

- значение абсолютного нуля по шкале Кельвина ( $T = 0 K$ ,  $t_z = -273,1496^{\circ}C$ ) определяется исключительно выбранным опорным состоянием (нормальные условия:  $p_0 = 101325 Pa$  и  $t_0 = 0^{\circ}C$ ), причем температура абсолютного нуля в шкале Цельсия находится из условия, что  $\rho_0 = \frac{p_0 v_0}{p_0 v_{100}} = \frac{v_0}{v_{100}}$ ;  $T_0 = 100\rho_0/(1-\rho_0)$ . При этом условно принимается, что  $1^{\circ}C = 1K$ . Из уравнения  $T = b\rho$  следует, что шкала Кельвина является положительной шкалой, т.к. геометрическая вероятность  $\rho \geq 0$ ;
- уравнение Клапейрона вытекает как следствие из уравнения (4), из которого:

$$T = 373,1496\rho = 373,1496 \frac{pv}{p_0 v_{100}} = \frac{373,1496}{1,3661} \frac{pv}{p_0 v_0}. \quad (5)$$

Из (5) получаем уравнение в виде:  $pv = R_i T$ , где индивидуальная газовая постоянная равна  $R_i = 0,003661 p_0 v_0$ , что полностью соответствует опытным данным и экспериментальным зависимостям [5, 6].

Таким образом, процедуры термометрии, которые используются в термодинамике, построены на принципе линейного шкалирования геометрической вероятности. Причем модель идеального газа предполагает, что его параметры состояния  $v$  и  $p$  подчинены равномерному вероятностному распределению, что не является характерным для реальных систем. Как видно, статистическое моделирование позволяет установить уравнение Клапейрона практически без проведения термодинамических экспериментов.

**Законы идеального газа.** Кроме уравнения Клапейрона для идеального газа имеется опытный факт, который связан с существованием понятий количества теплоты и теплоемкостей. Количество теплоты  $Q$  – это физическая величина, показывающая интенсивность теплового взаимодействия в результате теплообмена. Для газов теплоемкость обычно равна:

$$c_l = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_l, \quad (6)$$

и представляет собой количество теплоты, необходимое для изменения температуры  $T$  на один градус в некотором процессе  $l$ . Так как справедливо соотношение  $dQ = c_l dT$ , то справедливы и соотношения:

$$\frac{\partial Q}{\partial v} = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right) \text{ и } \frac{\partial Q}{\partial p} = c_v \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right), \quad (7)$$

где  $c_p$  и  $c_v$  – теплоемкости идеального газа при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно. В самом общем случае величины  $c_p$  и  $c_v$  могут зависеть от

параметров  $v$ ,  $p$  или  $T$ . Исходя из вышеприведенного, изменение величины  $Q$  в любом процессе  $l$  может быть представлено в виде (8):

$$dQ = \left( \frac{\partial Q}{\partial v} \right) dv + \left( \frac{\partial Q}{\partial p} \right) dp, \quad (8)$$

или, с учетом соотношений (7), как:

$$dQ = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right) dv + c_v \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right) dp. \quad (9)$$

Возможность представления величины  $dQ$  в виде (9) определена понятием функции двух переменных и обоснована известным объемом эмпирических данных, характеризующих связь количества теплоты и температуры.

Согласно соотношениям дифференциальной геометрии дифференциальной форме Пфаффа (9) соответствует уравнение в частных производных первого порядка. Например, согласно уравнению Клапейрона, температура имеет вид однородной функции второй степени. Однородная функция второй степени, имеющая частные производные, удовлетворяет формуле Эйлера [4]:

$$T = \frac{1}{2} \left( v \frac{\partial T}{\partial v} + p \frac{\partial T}{\partial p} \right). \quad (10)$$

Уравнение (10) с учетом соотношений (7) может быть представлено в виде линейного неоднородного уравнения в частных производных первого порядка:

$$\frac{v}{2c_p} \frac{\partial Q}{\partial v} + \frac{p}{2c_v} \frac{\partial Q}{\partial p} = T. \quad (11)$$

Решение  $Q = Q(v, p)$  уравнения (11) геометрически представляет собой поверхность в пространстве  $E^3(v, p, Q)$ , которая называется интегральной поверхностью. Для получения решения данного уравнения воспользуемся методом характеристик, которые определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений [7]:

$$2c_p \frac{dv}{v} = 2c_v \frac{dp}{p} = \frac{dQ}{T} = ds, \quad (12)$$

где  $s$  – некий вещественный параметр, который можно определить как длину дуги, изменяющуюся вдоль характеристической кривой [7].

Из первых двух уравнений (12) сразу для величины  $ds$  получается известная из термодинамики зависимость для энтропии (13):

$$ds = \frac{dQ}{T} = c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p}; \quad s - s_0 = c_p \ln \left( \frac{v}{v_0} \right) + c_v \ln \left( \frac{p}{p_0} \right), \quad (13)$$

а из последнего – не менее известная формула  $dQ = Tds$ .

Таким образом, в геометрическом представлении энтропия является длиной дуги характеристических кривых, соответствующих полю направлений, которое определяется системой уравнений (12). Из теории также известно [7], что интегральное

решение  $Q = Q(v, p)$  уравнения (11) можно покрыть семейством характеристик, причем любая характеристическая кривая, определяемая уравнениями (12) и имеющая общую точку с интегральной поверхностью, целиком лежит на этой поверхности. Кроме того, для уравнения (11) существует вектор:

$$\vec{F} = \frac{v}{c_p} \mathbf{i} + \frac{p}{c_v} \mathbf{j}, \quad (14)$$

где  $\mathbf{i}$  и  $\mathbf{j}$  – единичные векторы, направленные соответственно по осям координат удельного объема  $v$  и давления  $p$ .

Так как характеристики определяются системой уравнений (12), то семейство поверхностей, ортогональных этим характеристикам, может быть найдено из скалярного произведения вектора (14) и единичного вектора  $\mathbf{e} = \mathbf{i} dv + \mathbf{j} dp$ , а именно  $(\vec{F} \cdot \mathbf{e}) = 0$ .

Последнее соотношение можно представить в развернутом виде уравнения Пфаффа:

$$\frac{v}{c_p} dv + \frac{p}{c_v} dp = 0. \quad (15)$$

Данное уравнение легко приводится к полному дифференциальному, поэтому существует потенциал  $P(v, p) = C$ , который можно представить в виде семейства поверхностей, ортогональных линиям энтропии.

Таким образом, энтропию и потенциал можно рассматривать как естественные координаты на поверхности  $Q = Q(v, p)$  и термодинамику идеального газа можно полностью изложить на принципах и соотношениях дифференциальной геометрии.

Теперь введем в рассмотрение величину  $du = c_v dT$ , которую определим как энергию идеального газа. Величина  $du$  является полным дифференциалом, так как величина  $dT$  – полный дифференциал по определению, исходя из существования уравнения Клапейрона. Представим (9) с учетом  $dQ = Tds$  в форме уравнения сохранения энергии:

$$dQ = du_* + pdv,$$

где  $du_*$  – некая величина, которая равна:

$$du_* = \frac{c_p - R_i}{R_i} pdv + \frac{c_v}{R_i} vdp,$$

Предположим, что  $du_*$  является полным дифференциалом, тогда применяя признак Эйлера, можно показать, что  $du_*$  есть полный дифференциал при условии:  $c_p - c_v = R_i$ . Последнее соотношение представляет собой известное уравнение Майера для идеального газа, при справедливости которого величина  $du_*$  тождественно равна  $du$ :

$$du_* = du = \frac{c_v}{R_i} d(pv) = c_v dT.$$

Таким образом, при условии:  $c_p - c_v = R_i$  уравнение (15) представляется через энергию идеального газа в виде:

$$dQ = du + pdv \text{ или } dQ = du + dA. \quad (16)$$

Если не накладывать жестких условий в виде уравнения Майера на взаимосвязь величин  $c_p$ ,  $c_v$  и  $R_i$ , то величина  $du_*$  не будет полным дифференциалом.

Важным является результат, вытекающий из приведенных выше зависимостей, суть которого можно выразить в виде: возможность представления закона сохранения энергии для идеального газа в форме (16) является следствием существования уравнения Клапейрона  $pV = R_i T$ , которое нами определено на основании статистических экспериментов, а также калорических зависимостей для количества теплоты вида (6). Поэтому данное уравнение является в своей основе следствием исходных соотношений и обосновано в данном случае теоретически.

Подводя итог, следует отметить, что на основе соотношений дифференциальной геометрии нами обоснован принцип существования энтропии идеального газа, получены зависимости для ее определения, а также сформулировано уравнение сохранения энергии в форме первого закона термодинамики. Причем уравнение сохранения энергии в форме (16) является следствием, вытекающим из принципа существования энтропии и справедливости зависимостей вида (12).

В данном исследовании не будем затрагивать вопросы, связанные со вторым законом термодинамики, и, в частности, с принципом возрастания энтропии для необратимых процессов. Особенностью таких процессов является то, что состояния термодинамических систем и процессы их изменения в этом случае уже не являются равновозможными.

**Вычислительный эксперимент и законы идеального газа.** Теперь на основе статистического моделирования подтвердим полученные зависимости для идеального газа. Используя метод Монте-Карло, проведем статистический эксперимент, позволяющий сгенерировать множество процессов изменения состояний идеального газа.

Например, для гелия, генерируя равномерно распределенным генератором случайных чисел значение удельного объема  $V$  от нуля до  $V_{100}$  и значение давления  $p$  от нуля до  $p_0$ , получим 1000 состояний, которые будут определять начало процесса (точки  $A_1(V_1, p_1)$ ). Аналогично создаем еще 1000 состояний, которые будут определять конец процесса (точки  $A_2(V_2, p_2)$ ). Соединяя точки  $A_1$  и  $A_2$  прямыми линиями, получим 1000 процессов изменения состояний гелия. Теперь на множестве этих процессов проверим справедливость закона сохранения энергии вида (16).

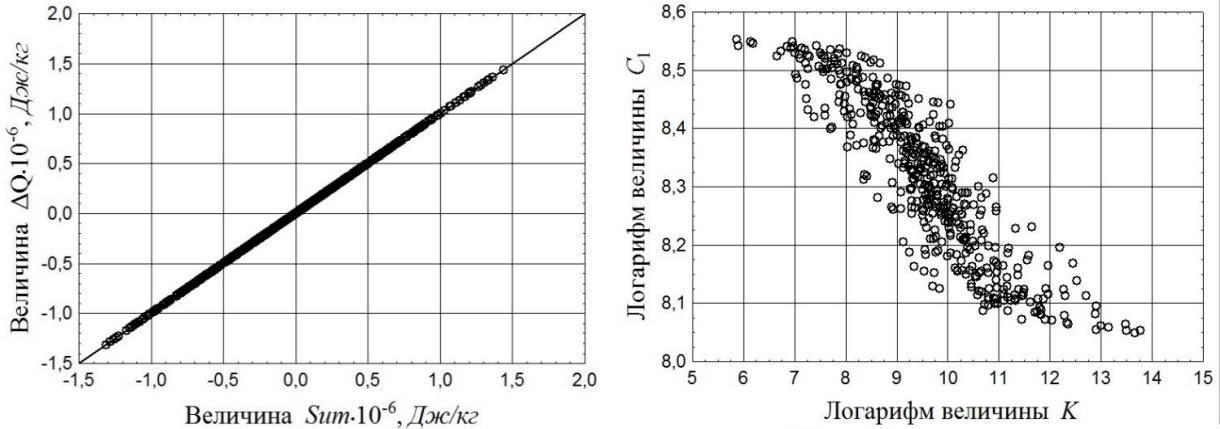
Интегрируя (16) по линии каждого процесса от точки  $A_1$  до точки  $A_2$ , находим:

$$\Delta Q = \frac{c_p}{R_i} (p_2 - p_1)(V_2 - V_1) + k \frac{c_p + c_v}{2R_i} (V_2^2 - V_1^2),$$

где  $k = (p_2 - p_1)/(V_2 - V_1)$ . Аналогичным образом получим:

$$\Delta U = c_v (T_2 - T_1); \Delta A = (p_1 - kV_1)(V_2 - V_1) + k(V_2^2 - V_1^2).$$

Результаты обработки данных вычислительного эксперимента для 1000 процессов изменения состояния гелия приведены на рисунке 2, а.



а) уравнение сохранения энергии (16),  
 $Sum = \Delta U + \Delta A$  (число статистических  
экспериментов – 1000)

б) зависимость теплоемкости гелия  $c_l$  от  
коэффициента  $k$ , характеризующего направление  
процесса ( $c_l > 0$  и  $k > 0$ )

Рис. 2. Результаты статистического моделирования процессов изменения состояний гелия

Как видно из рисунка, уравнение (16) абсолютно точно выполняется по крайней мере для линейных термодинамических процессов. Аналогичные результаты были получены и для других идеальных газов (водород, кислород, азот, неон и т.д.).

Данные результаты для двух переменных состояния  $v$  и  $p$  могут быть достаточно наглядно геометрически интерпретированы. Если найдено решение уравнения (11), то в пространстве  $E^3(v, p, Q)$  существует соответствующая интегральная поверхность  $Q = Q(v, p)$ . В этом же пространстве можно провести еще одну поверхность  $u = u(T) = u_1(v, p)$ , при этом величины  $Q$  и  $u$  имеют одинаковые единицы измерения. В этом случае функция количества теплоты  $Q = Q(v, p)$  может быть всегда представлена в виде суммы энергии состояния  $u = u(T)$  и некой аппроксимирующей функции, зависящей от переменных состояния  $v$  и  $p$ . В этом и будет заключаться геометрическая сущность эмпирического закона сохранения энергии для идеального газа, который представляется в форме (16).

Методом статистического моделирования можно получить также новые зависимости, которых не было в термодинамике идеального газа. Например, один из слабо изученных вопросов – это установление зависимостей для теплоемкости идеального газа для любых термодинамических процессов при произвольном изменении величин  $v$  и  $p$ . Так как величина  $k$  отражает направление линейного процесса, то можно найти связь этой величины с теплоемкостью  $c_l$ . На рисунке 2, б показана соответствующая зависимость для этих величин, которая носит нелинейный характер.

Предложенный подход открывает дополнительные возможности в изучении процессов изменения состояний идеальных газов. Этим путем могут изучаться нелинейные термодинамические процессы или исследоваться влияние скорости проведения процессов через их параметрическое задание относительно времени  $\tau$ :

$$\nu = \nu_l(\tau); \quad p = p_l(\tau). \quad (17)$$

Это является важным для развития теории термодинамики конечного времени. Возможен также новый взгляд на некоторые фундаментальные понятия термодинамики.

**О понятии абсолютной температуры.** Термодинамическая температура является фундаментальным понятием в термодинамике. Однако данная величина является в полном смысле математической моделью, опорная точка  $A_0$  для построения шкалы температуры принимается произвольно. Если исходить из полученного уравнения  $T_0 = 100\rho_0/(1-\rho_0)$ , то в зависимости от выбора значения  $\rho_0 = \nu_0/\nu_{100}$  значение абсолютного нуля в шкале Цельсия будет меняться.

Предположим, что существует идеальный газ, для которого значение  $\rho_0 = \nu_0/\nu_{100}$  равно не 0,732011, а, например,  $\rho_0 = 0,8$ , тогда значение абсолютного нуля будет равно  $T_0 = 400$ , в свою очередь, при  $\rho_0 = 0,5$  получим  $T_0 = 100$ . Можно возразить, что в природе таких газов не существует, однако это не снимает вопрос насколько при измерениях обоснованно переносить результаты моделирования на реальные объекты без проверки адекватности. Понятно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, принцип равновозможности состояний уже не выполняется, поэтому и экстраполяция термодинамической шкалы, как модели, в эту область вызывает определенные сомнения.

**Выводы.** Таким образом, законы идеального газа являются математическими моделями и могут быть найдены теоретическим путем с минимальным привлечением экспериментальных данных. Предложенный подход направлен на дальнейшее развитие классической термодинамики, за счет вычислительного эксперимента и методов дифференциальной геометрии. Дифференциальная геометрия позволяет применить методы теории поля к анализу термодинамических процессов и ввести в термодинамику время через параметрическое задание процессов вида (17) [3], а статистическое моделирование – привнести в классическую термодинамику вероятностные принципы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гухман, А. А. Об основаниях термодинамики / А. А. Гухман. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 383 с.
- Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник для вузов. – 4-е изд., стер. – Москва : Наука, 1969. – 576 с.
- Аверин, Г. В. Системодинамика: теория и приложения / Г. В. Аверин. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Донецк : Фолиант, 2022. – 535 с.
- Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : для университетов и педагогических институтов. – Изд 7-е, стер. – Москва : Наука, 1969-. - 2 т.
- Кирилин, В. А. Техническая термодинамика / В. А. Кирилин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – Москва : Энергия, 1974. – 448 с.
- Робертс, Дж. Теплота и термодинамика : перевод с английского / Дж. Робертс ; под ред. проф. М. П. Вукаловича. – Москва ; Ленинград : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. – 592 с.
- Кошляков, И. С. Уравнения в частных производных математической физики / И. С. Кошляков. – Москва : Высш. шк., 1970. – 712 с.

Поступила в редакцию 04.07.2022 г., рекомендована к печати 21.07.2022 г.

**SUBSTANTIATION OF THE PROVISIONS OF THE THERMODYNAMICS OF AN IDEAL GAS BY  
MATHEMATICAL MODELING METHODS**

*Averin G.V., Zviagintseva A.V.*

One of the most important features of the statics and dynamics of an ideal gas is that its states and the thermodynamic processes of their changes are equally possible, the second feature is that all positions and models can be represented by geometric objects in three-dimensional space. Methods of statistical modeling and differential geometry theoretically substantiate the basic provisions and laws of an ideal gas: the Clapeyron equation, the Mayer equation, the principle of the existence of entropy, the law of conservation of energy, etc. New relations and calculated dependences are obtained. Several ideas aimed at further development of classical thermodynamics are presented.

**Keywords:** thermodynamics of an ideal gas, methods of statistical modeling and differential geometry, laws and relations, computational experiment.

**Аверин Геннадий Викторович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: averin.gennadiy@gmail.com

**Averin Gennadii Viktorovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Звягинцева Анна Викторовна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: a.zvyagintseva@donnu.ru

**Zviagintseva Anna Viktorovna**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Computer Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## СЕГМЕНТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ СПЕКТРОГРАММ ТЕХНИЧЕСКИХ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ

© 2022 Третьяков И.А.

В данной работе рассмотрена сегментация экспериментальных кривых спектrogramм технических каналов утечки информации и побочных электромагнитных излучений и наводок посредством алгоритма частичной аппроксимации на основе функции сложности. Показана структурная схема такого алгоритма.

**Ключевые слова:** сегментация, аппроксимация, функция сложности, анализ данных, экспериментальные кривые, спектrogramма, ПЭМИН.

**Введение.** Анализ экспериментальных данных составляет значительную часть различных научных исследований, результатами которых являются экспериментальные кривые (хроматограммы, электрокардиограммы и электроэнцефалограммы, спектrogramмы, сейсмограммы и т.д.) [1-3]. В тоже время актуальной научно-технической задачей в области информационной безопасности является обнаружение технических каналов утечки информации и побочных электромагнитных излучений и наводок [4, 5].

В данной работе рассмотрен один из важных этапов анализа экспериментальных кривых спектrogramм технических каналов утечки информации – сегментация. Проведенный сравнительный анализ методов сегментации [6] показал, что предложенные в [7] алгоритмы сегментации можно назвать локальными, поскольку отнесение каждого участка кривой к простым либо к сложным основано на анализе поведения кривой только на данном элементарном участке и в его ближайшей окрестности. Данные алгоритмы сегментации используют минимум априорной информации о характере обрабатываемой кривой и могут применяться как для поиска сложных участков, соответствующих смене состояний исследуемого процесса, так и для выделения аномальных событий на общем простом фоне.

Однако, в случае с исследованием спектrogramм технических каналов утечки информации (рис. 1) сегментацию более целесообразно проводить на основе анализа всей кривой в целом и определения относительной степени изменчивости ее поведения на отдельном участке в зависимости от общего уровня изменчивости исследуемой кривой. Для этого в данной работе предложен алгоритм частичной аппроксимации.

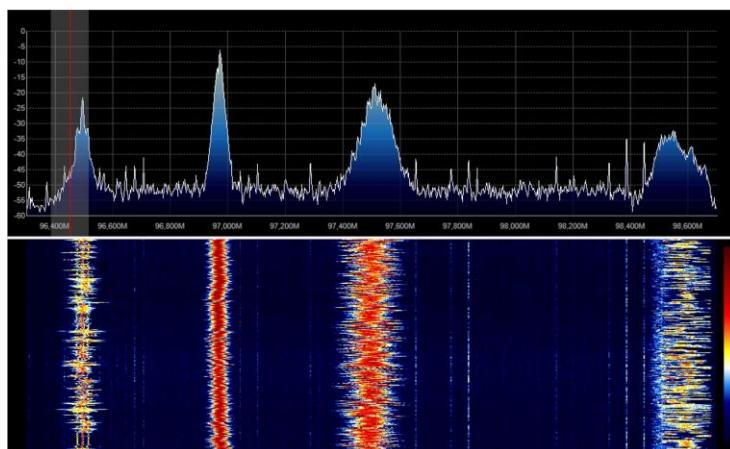


Рис. 1. Спектrogramма радиообстановки

**Алгоритм частичной аппроксимации.** Пусть анализируемая экспериментальная кривая представлена в виде чередования участков простого фона, общего для всей кривой, и сложных, т. е. априори неизвестных, возмущений, локализованных на части области определения. При этом результат сегментации строится из двух моделей: модели, объясняющей простой фон, и описания расположения участков, содержащих сложные возмущения. Из содержательных соображений может быть назначена общая длина системы сложных участков.

В качестве сложных выбирается такая система участков заданной общей длины, удаление которой позволяет наилучшим образом аппроксимировать поведение кривой на оставшейся части области определения моделью из заданного класса моделей. Априорные представления о простых формах поведения кривых выражим в виде некоторого подмножества  $E$  в множестве  $F$  всех возможных кривых, определенных в области изменения аргумента  $T$ . Экспериментальная кривая  $e(t)$  из  $E$  может рассматриваться как простая на всей области определения. Тогда поведение

произвольной кривой  $f(t) \in \frac{F}{E}$  можно приближенно описать, указав простую кривую  $e(t) \in E$  достаточно близкую к  $f(t)$  вне некоторой системы участков

$\omega$  в интервале  $T$  и значительно отличающуюся от нее на  $\frac{T}{\omega}$ . Область  $\frac{T}{\omega}$

соответственно будет простой частью кривой  $f(t)$ , а множество  $\omega$  – системой сложных участков (рис. 2).

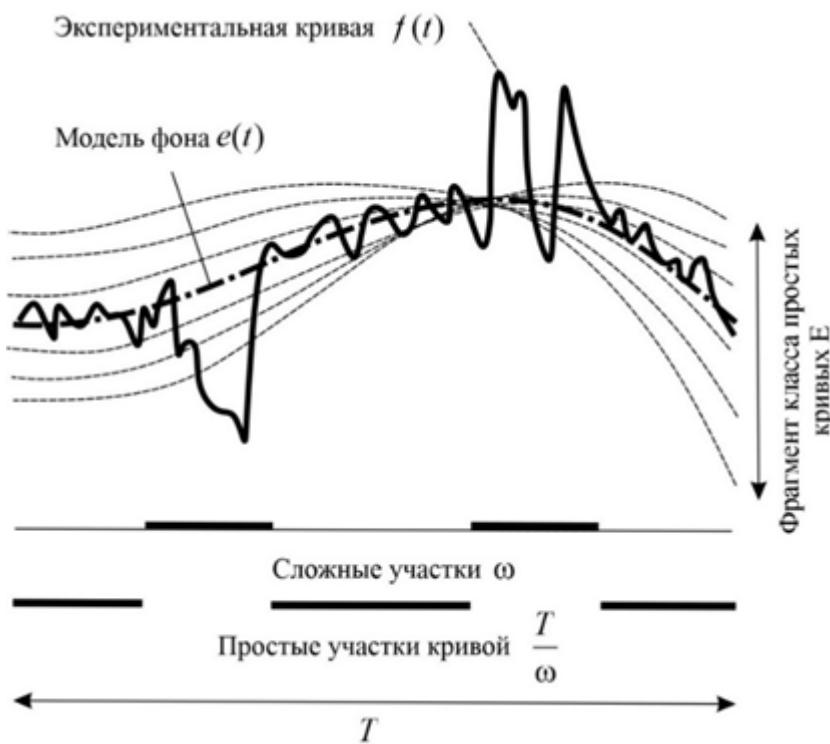


Рис. 2. Выделение сложных участков экспериментальной кривой алгоритмом частичной аппроксимации

В качестве способа задания класса простых кривых примем множество многочленов  $e(t) = \sum_{i=1}^m c_i \phi^i(t)$  по некоторой фиксированной системе линейно независимых функций  $\{\phi^i(t), i = 1, \dots, n\}$ , определенной на интервале  $T$ , выбор которой зависит от решаемой задачи. Учитывая вышесказанное, алгоритм частичной аппроксимации состоит из следующих шагов:

- обозначается через  $\Omega_d$  класс всех подмножеств  $\omega \subset T$ , имеющих заданную длину  $\mu(\omega) = d$ .

- экспериментальной кривой  $f(t)$  сопоставляется функция множеств  $\varphi(\omega)$ , определенную на классе подмножеств  $\Omega_d$  и численно равную интегральной квадратичной норме остаточного члена многочлена наилучшего приближения  $f(t)$  по системе  $\{\phi^i(t)\}$  на множестве  $\frac{T}{\omega}$ , которая и будет являться функцией сложности:

$$\varphi(\omega) = \int_{T/\omega} s^2(\omega, t) dt,$$

где  $s(\omega, t)$  - остаточная невязка этого приближения:

$$s(\omega, t) = f(t) - \sum_{i=1}^n c_i(\omega) \phi^i(t),$$

где  $c_i(\omega)$  - коэффициенты многочлена наилучшего приближения;

- находится для данной функции  $f(t)$  среди всех подмножеств  $\omega \in \Omega_d$  ее интервала определения подмножество  $\omega^*$ , доставляющее функции сложности  $\varphi(\omega)$  минимальное значение.

При дискретном задании экспериментальной кривой  $f_t$  на конечном интервале  $T = \{1, \dots, N\}$  в качестве системы базисных функций используется система  $N$ -мерных векторов  $\{\phi_t^i, i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, N\}$ . В качестве класса подмножеств области определения  $\Omega_d$ , среди которых ищется система сложных участков,

рассматривается множество всех подмножеств  $\omega \subset T$ , состоящих из заданного числа точек  $d$ . Тогда, функция сложности  $\varphi(\omega)$ , определенная на  $\Omega_d$ , принимает вид:

$$\varphi(\omega) = \sum_{t \notin \omega} s_t^2(\omega),$$

где  $s_t(\omega)$  - остаточная невязка этого приближения:

$$s_t(\omega) = f_t - \sum_{i=1}^n c_i(\omega) \phi_t^i,$$

где  $c_i(\omega)$  - коэффициенты многочлена наилучшего приближения кривой  $f_t$  по системе векторов  $\{\phi_t^i, i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, N\}$  на множество отсчетов  $\frac{T}{\omega}$ .

Таким образом, вышеописанный алгоритм можно представить в виде структурной схемы (рис. 3).



Рис. 3. Структурная схема алгоритма частичной аппроксимации

**Заключение.** Таким образом, в работе рассмотрена сегментация экспериментальных кривых спектrogramм технических каналов утечки информации и побочных электромагнитных излучений и наводок как один из важных этапов анализа данных. Предложен алгоритм частичной аппроксимации на основе функции сложности и показана его структурная схема.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгоритмы обработки сейсмической информации / Е. Е. Разумов, С. М. Простов, С. Н. Мулёв, Г. Д. Рукавишников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №2. – С. 17-29. – DOI: 10.25018/0236-1493-2022-2-0-17.
2. Третьяков, И. А. Исследование спектrogramм радиочастот методами лингвистического анализа / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 3. – С. 45-51. – DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-45-51.
3. Анализ и обработка электрокардиосигналов / Е. А. Алтай, Д. Шаяхметкызы, Е. С. Кунесбеков, М. С. Алмухаметова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №12 (54). – С. 54-57. – DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.013.
4. Рушечников, Я. И. Информационная технология радиомониторинга на основе программно-определенной радиосистемы / Я. И. Рушечников, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 31-36.
5. Маньков, Е. А. Аналитические модели временных характеристик процессов перехвата речевой информации и контроля защищенности речевой информации от утечки по техническим каналам на объектах информатизации / Е. А. Маньков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 42-52. – DOI:10.21685/2072-3059-2022-1-4.
6. Третьяков, И. А. Сравнительный анализ методов параллельной сегментации экспериментальных кривых / И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IV Международной научной конференции (Донецк, 31 октября 2019 г.). – Том 1: Физико-математические и технические науки. Часть 2 / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2019. – С. 176-178.
7. Алгоритмы идентификации переходных участков экспериментальных кривых с применением аппроксимации / В. В. Данилов, И. А. Третьяков, А. В. Шалаев, Я. И. Рушечников // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 48. – С. 19-23.

*Поступила в редакцию 20.07.2022 г., рекомендована к печати 08.08.2022 г.*

## SEGMENTATION OF EXPERIMENTAL SPECTROGRAM CURVES OF TECHNICAL CHANNELS OF INFORMATION LEAKAGE

*Tretiakov I.A.*

In this paper, the segmentation of experimental spectrogram curves of technical channels of information leakage and spurious electromagnetic radiation and interference by means of a partial approximation algorithm based on the complexity function is considered. A block diagram of such an algorithm is shown.

**Keywords:** segmentation, approximation, complexity function, data analysis, experimental curves, spectrogram, TEMPEST.

**Третьяков Игорь Александрович**

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

**Tretiakov Igor Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МУЛЬТИРЕШЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕКРЫТИЯ В ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЕ

© 2022 *Иваница С.В., Иванников Д.Д.*

---

В данной статье рассмотрен метод применения общего решения к задаче отказоустойчивого интегрирования абстрактных оценок датчиков, когда число датчиков очень мало, а большое количество неисправностей датчиков могут быть скорректированы вручную. В качестве примера реализации приведен алгоритм  $O(n \log n)$ , в котором необходимо использовать оптимальное количество  $n$  датчиков, с помощью которых может быть эффективно реализована предлагаемая идея.

**Ключевые слова:** декомпозиция, функция перекрытия, сенсорная система, отказоустойчивость, мультирешение, датчик.

---

**Введение.** Проблема распределенной обработки датчиков в контексте распределенных сенсорных сетей включает в себя проблему отказоустойчивой интеграции информации от нескольких датчиков.

Методы интеграции отказоустойчивых датчиков должны быть надежными в том смысле, что даже если некоторые из датчиков неисправны, интегрированный выходной сигнал все равно должен быть надежным. В этой статье рассмотрен метод интеграции датчиков с использованием способов декомпозиции с несколькими решениями [1]. Декомпозиция с несколькими решениями – это изображение в частотных каналах с постоянной полосой пропускания в логарифмическом масштабе.

Преобразования с несколькими решениями стали предметом обширных исследований после публикации научной работы [2] американских ученых А. Розенфельда и У. Терстона по обнаружению многомасштабных краев. Авторы работы [2] определили, что детали произвольного изображения характеризуют различные типы физических объектов в разных масштабах, в то время как при грубом решении можно различить грубые формы крупных объектов на изображении, точные контуры, текстуры и мелкие детали при последовательно увеличивающихся решениях (мультирешениях). Мультирешение предполагает простую иерархическую структуру для интерпретации информации об изображении. Аппроксимация сигнала  $f$  с решением  $r$  определяется как оценка, полученная путем равномерной выборки ( $f$ )  $r$  раз на единицу длины.

В работе [3] разработан эффективный алгоритм для вычисления аппроксимации функции при различных решениях. В этой статье обозначен метод применения идеи общего решения к проблеме отказоустойчивой интеграции абстрактной оценки датчиков, когда в огромном количестве датчиков большинство датчиков отключаются вручную. Идея, по сути, состоит в построении простой функции из выходных данных датчиков в кластере и решении этой функции в различных последовательно более мелких масштабах, чтобы изолировать область, над которой расположены правильные датчики. Приведен оптимальный алгоритм, который эффективно реализует эту идею.

Распределенная сенсорная система состоит из пространственно-распределенных датчиков, которые обнаруживают и количественно оценивают определенное явление по его изменяющимся параметрам. Показания датчиков отправляются через регулярные промежутки времени в блоки обработки, которые объединяют эти

показания и выдают выходные данные, природа которых во многом совпадает с входными данными датчиков. Выходные данные процессоров, представляющих кластеры датчиков, позже интегрируются, чтобы получить полную картину пространственно-распределенного явления. Однако, прежде чем интеграция будет выполнена на уровне процессора, необходимо иметь надежные оценки для каждого процессора. Каждый датчик в кластере измеряет один и тот же параметр. Возможно, что некоторые из этих датчиков неисправны. Следовательно, желательно использовать эту избыточность показаний в кластере для получения правильной оценки считываемых параметров. Иными словами, требуется отказоустойчивый метод интеграции датчиков для получения правильной оценки.

Профессор Калифорнийского университета К. Марзулло рассмотрел проблему отказоустойчивого интегрирования абстрактных интервальных оценок и обобщил его оценки для многомерных датчиков [4, 5].

**Постановка задачи.** Представляется важным исследование метода отказоустойчивой интеграции датчиков для динамических приложений реального времени, при котором выполнен анализ функция перекрытия, которая выведена в [6], используя методы декомпозиции с несколькими решениями. Далее, для большей ясности этот подход будет описан в общих чертах для абстрактных интервальных оценок. Тем не менее, предлагаемая методология легко и плодотворно обобщается на выходные данные датчиков более высокой размерности.

**Основные определения.** Для комфорtnого восприятия излагаемого в данной работе материала, необходимо выделить ряд определений и обозначений.

**Определение 1: абстрактный датчик** – датчик, который считывает физический параметр и выдает абстрактную интервальную оценку  $I$ , который является ограниченным и связанным подмножеством вещественной прямой  $R$ .

**Определение 2: правильный датчик** – абстрактный датчик, в котором оценка интервала содержит фактическое значение измеряемого параметра. Если оценка интервала не содержит фактического значения измеряемого параметра, то датчик считается *неисправным*.

**Определение 3:** Пусть информация от датчиков  $S_1, \dots, S_n$  поступает в процессор  $P$ . Пусть абстрактная интервальная оценка  $S_j$  равна  $I_j$ : ( $1 \leq j \leq n$ ), замкнутый интервал  $[a, b]$  с конечными точками  $a$  и  $b$ . Тогда **характеристическая функция**  $\chi_j$   $j$ -го датчика  $S_j$  определяется следующим образом (1):

$$\chi_j(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in I_j, \\ 0, & \text{если } x \notin I_j. \end{cases} \quad (1)$$

**Определение 4:** Функция  $O(x)$  – «функция перекрытия»  $n$  абстрактных датчиков:

$$O(x) = \sum_{j=1}^n \chi_j(x). \quad (2)$$

Для каждого  $x \in R$ , функция  $O(x)$  задает количество интервалов датчиков, в которых находится значение  $x$ , или количество интервалов, пересекающихся в точке  $x$ .

**Определение 5:** Датчик является **явно неисправным**, если это *неисправный датчик* и если он перекрывается *правильным датчиком*.

Иными словами, если  $f$  из  $n$  датчиков неисправны, то, принимая  $(n-f)$ -пересечение в качестве оценки интервалов  $n$  датчиков, с уверенностью можно сказать, что правильное значение измеряемого параметра находится в одном из этих  $(n-f)$ -пересечений. Когда количество датчиков велико и количество неисправностей не может быть строго ограничено,  $(n-f)$ -пересечения могут быть сильно «разбросанными» относительно реального значения, что негативно влияет на измеряемую точность. Чтобы улучшить точность выходных данных в подобных случаях, необходимо иметь возможность дополнительно сравнить полученные  $(n-f)$ -пересечения, чтобы выбрать «наилучшее возможное» пересечение, которое содержит правильное значение с высокой надежностью.

В работах [1, 6] проводилась оценка  $(n-f)$ -пересечений, путем суммирования всех пересекающихся интервалов и использующих в качестве меры определенное  $(n-f)$ -пересечение.

**Определение 6: ранг интервальной оценки** – это количество пересекающихся интервалов. Обоснование этой оценки основано на наблюдении, что явно неисправные датчики будут находиться близко к правильному значению, тем самым перекрываясь со значениями правильных датчиков  $(n-f)$ -пересечения, способствуя надежности измерений.

Вычисление достоверности  $(n-f)$ -пересечений является трудоемким с точки зрения вычислений и ограничивает приложения в реальном времени. Однако закономерность рассеивания явно ошибочных интервалов можно наблюдать, изучая функцию перекрытия  $O(x)$  в разных масштабах. Области, где  $O(x)$  максимальны, представляют интерес, поскольку они содержатся в  $(n-f)$  пересечениях для каждого  $f$ . Следовательно, правильное значение лежит в этих областях с очень высокой вероятностью. Однако могут быть несколько пространственно-разделенных максимальных пересечений, некоторые из них вызваны пересечениями сильно неисправных датчиков. В таком случае необходимо изучить разбросы пиковых значений (далее – «пиков»), содержащих максимальные пересечения.

Большой разброс указывает на сильную кластеризацию датчиков, указывая на ручные неисправности и, следовательно, вероятно, на «правильное» максимальное пересечение. Однако этот анализ одновременного выбора «пиков» с большими амплитудами и широкими разбросами не может быть выполнен на  $O(x)$  непосредственно. Функция  $O(x)$  имеет особенности в нескольких масштабах. Происходит анализ  $O(x)$  из грубого масштаба и осуществляется выбор «пиков» с наибольшей амплитудой и самым широким разбросом. Затем осуществляется «увеличение масштаба» этого «пика», увеличивая диапазон наблюдения, и снова выполняем отбор на основе наибольшей амплитуды и самого широкого разброса. Эта операция выполняется в ряде масштабов, от грубого до мелкого, что приводит к выделению небольшой связанной области реальной линии, в которой  $O(x)$  принимает самые высокие значения.

**Особенности рассматриваемого метода.** Пусть например, для функции  $f(x)$  определены упорядоченные по возрастанию решения  $\{r_j\}_{j \in Z}$ . Тогда для  $f(x)$  значение  $r_j$  определяется как информационная разность между аппроксимацией  $f(x)$  при решении  $r_{j+1}$  и при решении  $r_j$ . При грубой обработке информации оценка характеризуется очень небольшим количеством выборок, следовательно, может быть выполнена быстро. Более точная обработка характеризуется большим количеством выборок, но

использование рекурсивного подхода к выполнению идентичных операций, ускоряет процесс вычислений.

При использовании стратегии «от грубого к точному» обрабатывается минимальное количество «семплов», необходимых для выполнения задачи уточнения измеряемых параметров. Начиная с самого грубого – в качестве «пиков» выбраны наибольшие из разброса пиковых значений. При следующем анализе этот «пик» снова проверяется на наличие в нем «пиков» с наибольшими амплитудами, и среди этих «пиков» тот, который имеет самый широкий разброс по амплитуде, сохраняется для более точного анализа при следующем решении.

Данная модель указывает на то, что изолированная область с высокой вероятностью содержит правильное значение наблюдаемых параметров. Схематическая демонстрация этой процедуры проиллюстрирована на рисунках 1–5, где  $O(x)$  на рис. 1 обрабатывается с использованием двоичных масштабов разложения. Преимуществом этой процедуры являются значительные, с точки зрения скорости, вычисления, поскольку обработка от «грубого к точному» приводит к устраниению больших областей  $O(x)$  при каждом разложении. Для обслуживания  $O(x)$  требуется  $O(n \cdot \log n)$  времени, где  $n$  – количество датчиков.

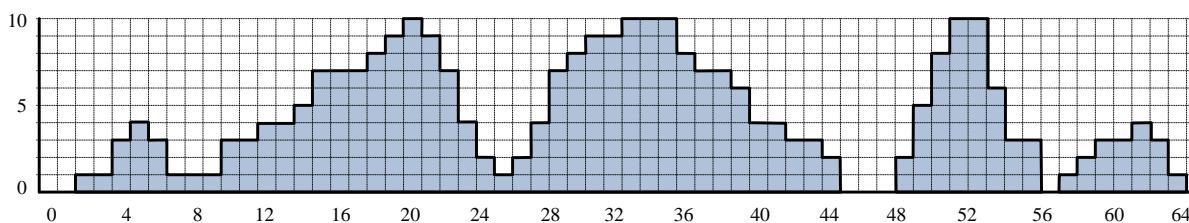


Рис. 1. Функция  $O(x)$  (заштрихованная область указывает на участки, которые можно корректировать)

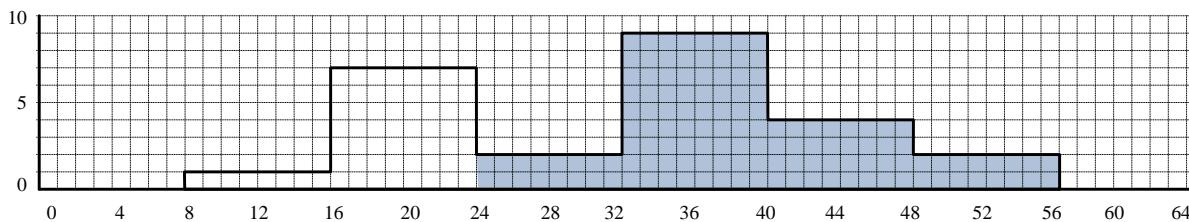


Рис. 2. Функция  $O^{-3}(x)$  (заштрихованные области шириной «пиков» в 8 бит подлежат дальнейшей коррекции)

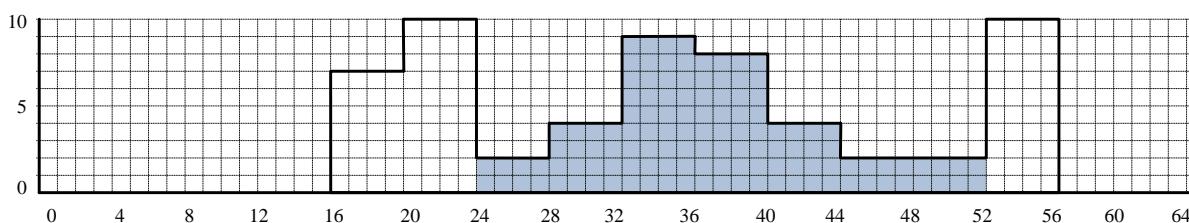


Рис. 3. Функция  $O^{-2}(x)$  (заштрихованная область с шириной «пиков» 4 бита, которая продолжает корректироваться)

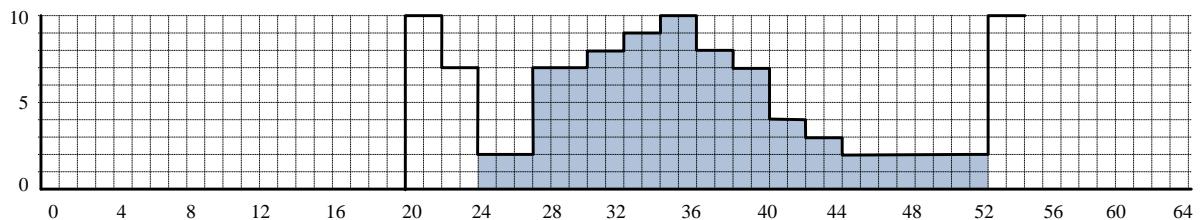


Рис. 4.  $O^{-1}(x)$  (заштрихованная область имеет ширину «пиков» в 2 бита).

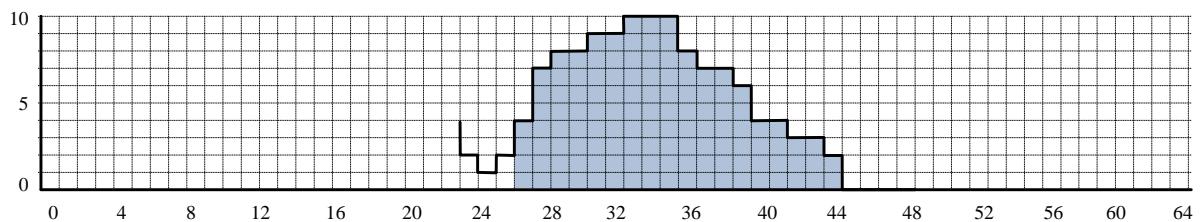


Рис. 5. Функция  $O^0(x)$  (заштрихованная область со средней шириной «пиков» в 1 бит) – в этот момент осуществляется выбор интервала, в котором «пик» достигает максимума

**Оценка датчиков в отказоустойчивой системе.** В рассматриваемой модели абстрактных датчиков предполагается, что:

- 1) большое количество неисправностей датчиков регулируется вручную;
- 2) длина каждой оценки интервала ограничена ниже  $l$  и выше  $L$ , где  $l < L$  и  $l, L$  – положительные действительные числа.

Действительно, оценка с очень большим интервалом слишком неточна, чтобы иметь какое-либо значение, поэтому может быть отброшена. С другой стороны, оценка очень малого интервала не поддавалась бы анализу отказоустойчивости. В абстрактных датчиках содержится минимальное допустимое отклонение  $\pm \frac{l}{2}$ , поэтому можно предположить, что ширина каждого интервала составляет не менее  $l$ . Это подразумевает, что временные сбои группируются в рамках допускаемого диапазона измеряемого параметра. При значительном количестве неисправных датчиков, т. к. большинство неисправностей регулируются вручную, это приводит к перекрытию неисправных датчиков между собой и увеличивает значение  $O(x)$  в рамках допустимого значения параметра, тем самым усиливая  $(n-f)$ -пересечение, содержащее правильное значение.

Пусть  $T$  – количество заведомо неисправных датчиков, имеющих диапазон от  $l$  до  $L$ . Явно неисправный датчик должен пересекаться с исправным датчиком. Следовательно, его конечная точка, ближайшая к правильному значению  $x_0$ , должна находиться на расстоянии не более  $L$  от  $x_0$ . Таким образом, наибольшее количество неисправных датчиков  $1 + \left\lfloor \frac{L}{l} \right\rfloor$  может быть размещено по обе стороны от  $x_0$ , т. е. по меньшей мере,  $\left\lceil \frac{T}{2} \left( 1 + \left\lfloor \frac{L}{l} \right\rfloor \right) \right\rceil$  неисправных датчиков перекрываются в области с шириной, по меньшей мере равной  $l$ , на расстоянии не более  $2L$  от  $x_0$ . Когда число

пересечений неисправных датчиков равно  $\left\lceil T/2 \left(1 + \left\lfloor \frac{L}{l} \right\rfloor\right) \right\rceil$ , ширина этого пересечения фактически составляет не менее  $2(l+L)$ . Когда число пересечений равно  $T$ , это приводит к «пику» с разбросом не менее  $l$ . Эта кластеризация усиливает ширину и высоту «правильного»  $(n-f)$ -пересечения, добавляя в его окрестности, по крайней мере, пик области  $Tl$ . В целом это приводит к более высокому и широкому «пику» в окрестности  $x_0$ . С другой стороны, неисправные датчики являются случайными по своему расположению и, будучи некоррелированными, как правило, не группируются в какой-либо ограниченной области. Таким образом, возникающие в результате  $(n-f)$ -пересечения, имеют более короткие и узкие «пики», представляющие их в  $O(x)$ . Было использовано общее решение для выделения устойчивых пиков в  $O(x)$ , рассмотрено  $O(x)$  с грубым решением, а затем уточнено  $O(x)$  по областям, в которых встречаются устойчивые пики, с помощью последовательных более точных решений и на каждом этапе уменьшена область, чтобы получить суженный интервал, в котором, скорее всего, содержится  $x_0$ .

**Мультирешение функции перекрытия.** Для датчиков  $S_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ), где  $n$  – количество абстрактных датчиков с их интервальными оценками  $[a_j, b_j]$ , имеющих характеристическую функцию  $\chi_j(x)$ , функция перекрытия  $O(x)$   $n$  таких датчиков задается формулой (2).

Для каждого  $j$  выборка  $O(x)$  может производиться через равные промежутки времени от  $1/2^j$  до получения  $j$ -го решения  $O(x)$  в масштабе  $2^{-j}$  в виде линейного набора значений функций, полученных масштабированием и переходом к одной функции. Пусть:

$$\sigma(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq 1, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим функцию  $\sigma(2^j x - n)$ ,  $j \in Z$ . Тогда, с учетом (3), получаем:

$$\sigma(2^j x - n) = \begin{cases} 1, & \text{если } 2^{-j} n \leq x \leq 2^{-j} (n+1), \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Итак,  $j$ -ое решение  $O(x)$  относится к системе (4), откуда:

$$O^j(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} O(2^{-j} n) \cdot \sigma(2^j x - n). \quad (5)$$

Поскольку  $O(x)$  имеет ограниченную область определения, приведенная в (5) сумма фактически выполняется над конечным числом  $n$ . Действительно, если  $a = \min_{1 \leq i \leq n} \{a_i\}$  и  $b = \max_{1 \leq i \leq n} \{b_i\}$ , тогда, согласно (5):

$$O^j(x) = \sum_{\lceil 2^j a \rceil}^{\lceil 2^j b \rceil} O(2^{-j} n) \cdot \sigma(2^j x - n).$$

Таким образом,  $O^j(x)$  получается из  $O(x)$  путем выборки в точках  $2^{-j}$ , лежащих между  $a$  и  $b$ . Чтобы изучить влияние выборки на представление функции  $O^j(x)$  при любом заданном решении, достаточно рассмотреть влияние выборки на примере тестовой функции:

$$g(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in [\alpha, \beta], \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где  $[\alpha, \beta]$  – произвольный замкнутый интервал.

Получаем функцию:

$$g^j(x) = \sum_{\lceil 2^j \alpha \rceil}^{\lceil 2^j \beta \rceil} g(2^{-j}n) \cdot \sigma(2^jx - n).$$

Возможны ситуации, которые могут произойти независимо от исходных параметров  $g^j(x)$ , но в зависимости от частоты выборки:

- 1) нижняя граница (слева) может быть «короче», но не более чем на  $2^{-j}$  по отношению к  $[\alpha, \beta]$ ;
- 2) верхняя граница (справа) может быть «длиннее», но не более чем на  $2^{-j}$  по отношению к  $[\alpha, \beta]$ .

Рассматривая значения  $O(x)$  необходимо соответствующим образом выбрать масштаб. Слишком большой масштаб не даст никакой полезной информации о структуре  $O(x)$ , в то время как слишком маленький масштаб не позволит выделить важные диапазоны, привнося ненужные перепады значений. И поскольку каждый датчик имеет ширину не менее  $l$ , желательно начинать с меньшего масштаба, чем значение  $l$  (или в том же порядке, что и  $l$ ), т. е.  $j = \log_2 \frac{1}{l}$ . Таким образом, каждый датчик будет фигурировать как функция, по крайней мере, такого же размера, как  $\frac{1}{2^j}$ .

Колебания  $O(x)$  происходят в точках  $a_i, b_i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) которые являются конечными точками интервальных оценок. Если  $a$  является наименьшим из  $a_i$  и  $b$  является наибольшим из  $b_i$ , то среднее число колебаний на единицу длины определяется как  $\frac{2n}{b-a}$ . Таким образом, чтобы зафиксировать все колебания, необходимо проводить решения, по крайней мере, пока  $j > \log_2 \frac{2n}{b-a}$ .

Процесс решения и выбора пиков с наибольшей площадью продолжается до тех пор, пока ширина, по которой должно выполняться дальнейшее решение, не станет меньше максимально допустимой ширины для оценки интегрированного выходного сигнала или когда дальнейшее решение не уменьшает область, выбранную из предыдущего решения. Конечная скорректированная область с наибольшим значением  $O$  принимается в качестве выходной оценки.

**Алгоритм**, который реализует описанный выше аналитический метод, может быть представлен следующим образом. Входные величины – конечные точки  $a_i, b_i$  интервальной оценки  $[a_i, b_i]$  датчиков  $S_i$ , при  $1 \leq i \leq n$ . Нижняя и верхняя границы

решения:  $j_0 = \log \frac{1}{l}$  и  $j_1 = \log \frac{2n}{\sup(O(x))}$ , где  $\sup(I)$  – функция, возвращающая верхнюю границу интервала  $I$ .

*НАЧАЛО.*

*Шаг 1.* Формирование массива упорядоченных пар:

$$[(a_1, 1), (b_1, -1), (a_2, 1), (b_2, -1), \dots, (a_n, 1), (b_n, -1)].$$

*Шаг 2.* Сортировка массива в порядке возрастания по отношению к первым компонентам упорядоченных пар, чтобы получить массив

$$[(a_1, \sigma_1), (a_2, \sigma_2), \dots, (a_{2n}, \sigma_{2n})],$$

где каждое значение  $a_i$  – это некоторое  $a_j$  или  $b_j$ ,  $a_i \leq a_{i+1}$ ,  $1 \leq i \leq 2n$ , поэтому

$$\sigma_i = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i = a_j, \\ -1, & \text{если } a_i = b_j. \end{cases}$$

*Шаг 3.* Осуществляется формирование массива

$$\left[ (-\infty, 0), (a_1, \sigma_1), \dots, \left( a_i, \sum_{j=1}^i \sigma_j \right), \dots, \left( a_{2n}, \sum_{j=1}^{2n} \sigma_j \right), (+\infty, 0) \right]$$

для представления функции перекрытия  $O(x)$ . Отметим, что  $\sigma_1 = +1$ ,  $\sum_{j=1}^{2n} \sigma_j = 0$ ,

$$a_0 = -\infty, \quad a_{2n+1} = +\infty.$$

*Шаг 4.* Задаются  $n_{j_0} = \lfloor 2^{j_0} a_1 \rfloor$  и  $n'_{j_0} = \lfloor 2^{j_0} a_{2n} \rfloor$ , чтобы из  $O(x)$  между  $\frac{n_{j_0}}{2^{j_0}}$  и  $\frac{n'_{j_0}}{2^{j_0}}$  получить  $O^{j_0}(x)$  – аппроксимацию  $O(x)$  на  $j_0$ -ом решении.

Далее производится выбор такого подинтервала из  $\left[ \frac{n_{j_1}}{2^{j_1}}, \frac{n'_{j_1}}{2^{j_1}} \right]$  при котором  $O(x)$  достигает максимума (или принимает значения, превышающие указанное значение). Тогда этот подинтервал принимается в качестве интегрированной выходной оценки  $n$  датчиков.

*КОНЕЦ.*

На рисунках 1–5 визуализирована реализация данного алгоритма. При этом переход от исходной функции  $O(x)$  к результирующей  $O^0(x)$  определен тем, что достигнута минимальная ширина «пиков» и получены границы оптимального интервала значений.

Если предположить, что параметр, измеряемый датчиками, как известно, лежит между определенными границами, то  $j > \log n + C$ , где  $C$  – некоторая константа. Таким образом, подпрограмма для получения  $O^j(x)$  будет вызываться в среднем  $O(\log n)$  раз. Следовательно, средняя сложность всего алгоритма равна  $O(n \cdot \log n)$ .

**Выводы.** Таким образом, полученные результаты позволяют применять рассмотренную методику обработки нескольких входных сигналов датчиков для получения точной и отказоустойчивой интервальной оценки в качестве интегрированного выхода. Проведенные расчеты позволяют изолировать наиболее заметные и устойчивые «пики» в отказоустойчивой сенсорной системе и последующее устранение более узких и менее заметных «пиков» как погрешностей измерения.

Использование метода мультирешения может быть применено и в других областях, например для уточнения важных характеристик сигналов и игнорирования факторы «шума» в вычислительных или измерительных системах. Этот метод также можно обобщить с некоторыми модификации многомерных датчиков. Также вышеприведенный метод имеет место в обработке дискретных сигналов при расчете функций (вейвлетов), анализирующих различные частотные компоненты данных.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Fault-tolerant integration of abstract sensor estimates using multiresolution decomposition / L. Prasad, S. S. Iyengar, R. Rao, R. L. Kashyap // Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference. – SMC. – 1993, vol. 5. – P. 171–176. – DOI: 10.1109/ICSMC.1993.390844.
2. Precision Bound of Distributed Fault-Tolerant Sensor Fusion Algorithms / Buke Ao, Yongcai Wang, Lu Yu, Richard R. Brooks, S. S. Iyengar // ACM Computing Surveys. – Vol. 49. – March 2017. – No.: 5. – P. 1–23.
3. Sniatala, P. Fundamentals of Brooks-Iyengar Distributed Sensing Algorithm: Trends, Advances, and Future Prospects / P. Sniatala, M. H. Amini, K. G. Boroojeni // Springer International Publishing, 2020 – 202 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-33132-0.
4. Alsubaie, N. M. Improving the Accuracy of Direct Geo-referencing of Smartphone-Based Mobile Mapping Systems Using Relative Orientation and Scene Geometric Constraints / N. M. Alsubaie, A. A. Youssef, N. El-Sheimy // Sensors. – 2017. – № 17(10):2237. – DOI: 10.3390/s17102237.
5. Bingfei, F. Improving the accuracy of wearable sensor orientation using a two-step complementary filter with state machine based adaptive strategy / Fan Bingfei, Li Qingguo, Liu Tao // Measurement Science and Technology, 2008. – DOI: 10.1088/1361-6501/aae125.
6. Functional characterization of sensor integration in distributed sensor networks / L. Prasad, S. S. Iyengar, R. L. Kashyap, R. N. Madan // Proceedings. The Fifth International Parallel Processing Symposium, 1991. – P. 186–193. – DOI: 10.1109/IPPS.1991.153777.

*Поступила в редакцию 01.08.2022 г., рекомендована к печати 23.08.2022 г.*

## **EVALUATION OF THE USE METHOD OF MULTIREOLUTION OVERLAPPING FUNCTION IN A FAILURE-SAFE SENSOR SYSTEM**

*Ivanitsa S.V., Ivannikov D.D.*

This article discusses a method for applying a general solution to the problem of fault-tolerant integration of abstract sensor estimates when the number of sensors is very small and a large number of sensor faults can be corrected manually. As an implementation example, an  $O(n\log n)$  algorithm is given, in which it is necessary to use the optimal number  $n$  of sensors with which the proposed idea can be effectively implemented.

**Keywords:** decomposition, overlap function, sensory system, fault tolerance, multiresolution, sensor.

### **Иваница Сергей Васильевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии, директор Центра информационных компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: sergey.ivanitsa@cs.donntu.ru

### **Ivanitsa Sergei Vasilevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Computer Engineering, Director of Center Information Computer Technologies of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Иванников Дмитрий Дмитриевич**

аспирант кафедры компьютерной инженерии, ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: neonmontig@gmail.com

### **Ivannikov Dmitrii Dmitrievich**

Postgraduate student at the Department of Computer Engineering of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПОСРЕДСТВОМ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2022 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В данной работе продолжено описание элементов специализированных автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн, на основе оптического зондирования, в частности, метода стационарной опорной решетки и метода «ножевой диафрагмы».

**Ключевые слова:** автоматизированная система, поверхностные акустические волны, дифракция, оптическое зондирование, диафрагма.

**Введение.** Оптические методы измерения параметров поверхностных акустических волн (ПАВ), благодаря их универсальности, высокой чувствительности и относительной простоте, находят широкое применение [1, 2]. По многочисленности обрабатываемой экспериментальной информации они трудно реализуемы без создания автоматизированных систем научных исследований (АСНИ). Обобщенные структуры АСНИ (без целевой принадлежности) показаны в [3]. Структуры АСНИ параметров ПАВ, показаны в работах [4, 5], с иной целевой принадлежностью созданных авторами, в работах [6-8]. Структура АСНИ параметров ПАВ на основе оптического зондирования, приведена на рисунке 1.

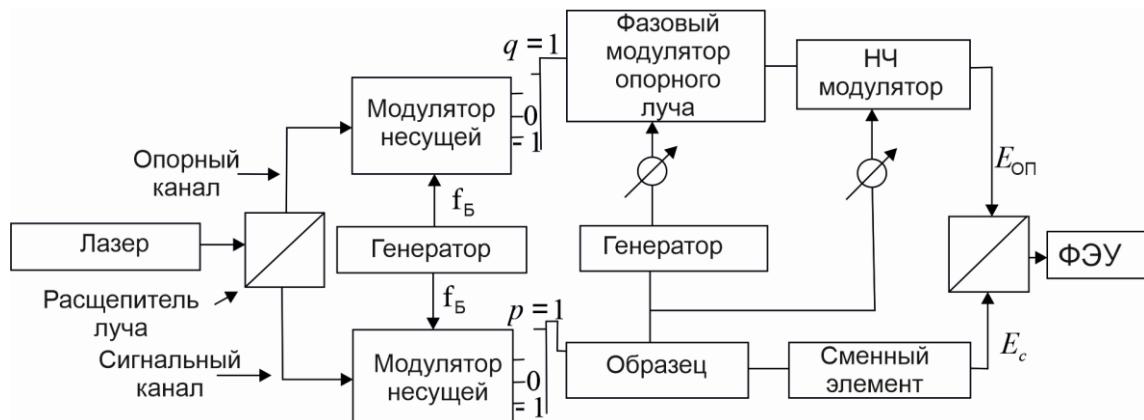


Рис. 1. Структура подсистемы АСНИ параметров ПАВ на основе оптического зондирования

**Метод оптического зондирования на основе стационарной опорной решетки.** При зондировании ПАВ узким световым лучом происходит фазовая модуляция света, глубина которой  $\Delta\varphi$  связана с амплитудой ПАВ  $\delta_0$  следующим соотношением:

$$\Delta\varphi = 2k_i \delta_0.$$

В случае регистрации света со слабой фазовой модуляцией и в случае повышенного уровня фона (работа с оптическими волноводами) представляет интерес выделение сигнала на несущей частоте, равной частоте ПАВ.

Если на пути распространения ПАВ (рис. 2) установить стационарную опорную решетку (ОР) с периодом  $l = \Lambda$  на которую направить свет, от лазера интенсивностью  $I_i$ , то в результате взаимодействия света с ПАВ и дифракции на опорной решетке интенсивность  $I_m^\Omega$  его в  $m$ -м дифракционном порядке оказывается промодулированной с частотой ПАВ  $\Omega$ :

$$I_m^\Omega = I_i R^2 g_m^\Omega \Delta\varphi, \quad (2)$$

где  $g_m^\Omega$  - коэффициент эффективности преобразования, зависящий от вида и формы опорной решетки.

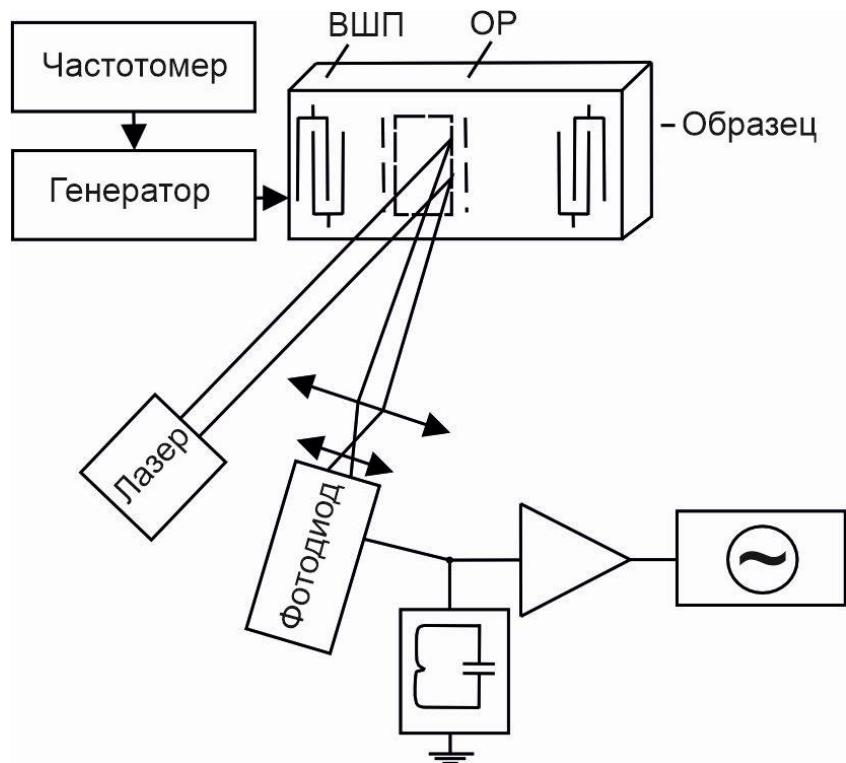


Рис. 2. Блок схема устройства измерения параметров ПАВ на основе стационарной опорной решетки

Ток в цепи фотодетектора с чувствительностью  $\eta$ , помещенного в первый порядок дифракции, имеет переменную составляющую:

$$i_\phi^\eta = \eta I_i R^2 g_m^\Omega \Delta\varphi \cos(\Omega t + \varphi) = J_{\phi m} \cos(\Omega t + \varphi). \quad (3)$$

Амплитуда ПАВ определяется из формул (1-3) как:

$$\delta_0 = (\lambda / 4\pi) i_0^\Omega / (I_i R^2 \eta g_m^\Omega).$$

Фазовый сдвиг  $\varphi$  в (3) зависит от относительного положения линий равной фазы ПАВ и линий опорной решетки на плоскости, и если эти линии не совпадают, то  $\varphi$  является функцией координат точки зондирования:

$$\varphi(x, y, t) = \Omega t + \varphi(x, y) = \Theta_{OP}(x, y) - \Theta_{PAB}(x, y, t) = \Delta\Theta(x, y, t),$$

где  $\Theta_{OP}$  и  $\Theta_{PAB}$  - пространственная фаза опорной решетки и ПАВ соответственно.

Измеряя разность фаз сигналов с выхода фотодетектора и с генератора возбуждения ПАВ и перемещая точку зондирования, получают распределение  $\varphi(x, y, t)$ . Высокая чувствительность метода ( $3 \cdot 10^{-4}$  нм) определяется тем, что регистрация отклика происходит на смещенной частоте. Тогда как при прямом зондировании значительные трудности при малых углах дифракции вызывают пространственное разделение нулевого и первого порядков.

**Метод «ножевой диафрагмы».** Метод основан на взаимодействии луча света, сфокусированного до размеров, меньших половины длины акустической волны, с ПАВ. В этом случае световой луч испытывает периодические отклонения, вызванные деформацией поверхности. Поскольку наклон поверхности с ПАВ меняется во времени, имеет место сканирование отраженного луча в пределах угла  $\alpha_M = K\delta_0$ . Для того чтобы интенсивность света, принимаемого фотодетектором, изменялась с частотой ПАВ, на пути светового пучка устанавливают ножевую диафрагму (НД), благодаря которой отклонение светового пучка преобразуется в амплитудную модуляцию (рис. 3).

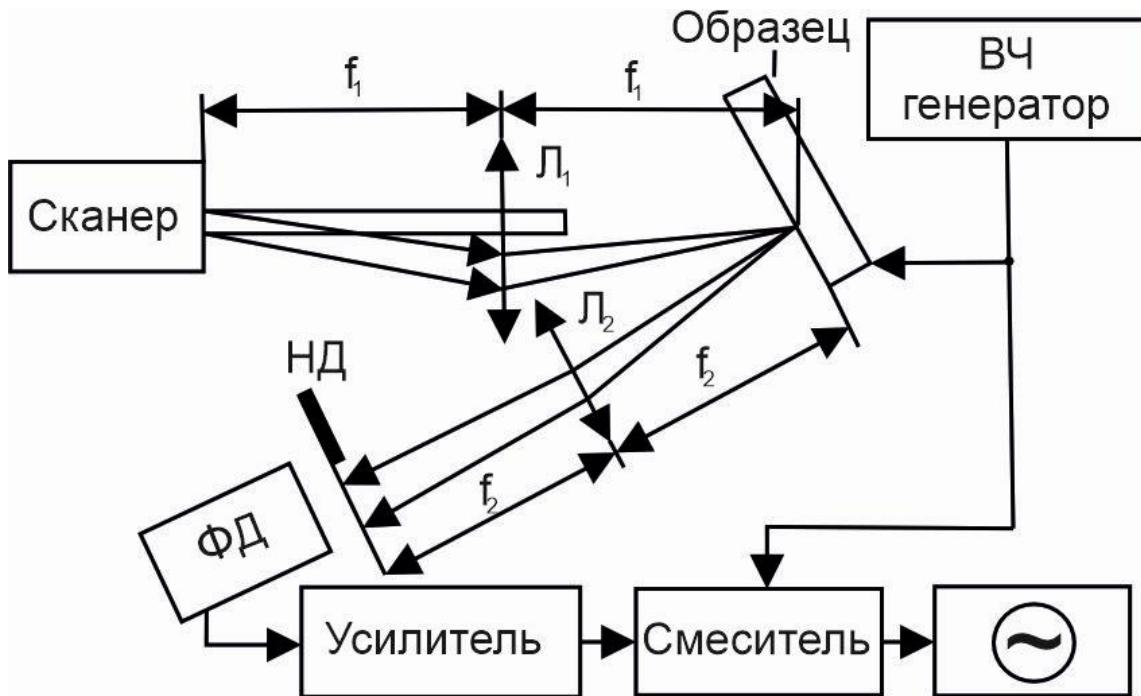


Рис. 3. Блок схема устройства измерения параметров ПАВ на основе «ножевой диафрагмы»

В плоскости клина ножевой диафрагмы пятно будет сдвигаться на величину:

$$2f_2\alpha = 4(\pi / \Lambda)\delta_0 \cos(\Omega t + \varphi_0),$$

где  $f_2$  - фокусное расстояние линзы  $L_2$ ,  $\varphi_0$  - начальная фаза ПАВ, зависящая от положения светового пятна на поверхности образца. Учитывая отнесенное, интенсивность на входе фотодетектора (ФД) будет равна:

$$I_C = I_i R^2 2\alpha f_2 / (D f_2 / f_1) = I_i R^2 (f_1 / D) (4\pi / \Lambda) \delta_0 (\Omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где  $D$  - размер пятна в плоскости сканера. Выражение (4) показывает, что интенсивность света в плоскости ножевой диафрагмы пропорциональна амплитуде ПАВ и изменяется с частотой ПАВ.

Если этот сигнал смешивается с опорным электрическим сигналом от генератора возбуждения ПАВ (рис. 3), то выходное напряжение смесителя будет зависеть от относительного фазового сдвига между смешиваемыми сигналами. При зондировании в направлении распространения ПАВ, положительные значения выходного сигнала смесителя (при сдвиге фаз, равном целому, кратному 2) чередуются с отрицательными (при сдвиге фаз  $(2n+1)\pi$ ). При подаче этого сигнала на осциллограф, развертка которого синхронизирована со сканером, можно наблюдать изображение фронтов ПАВ в виде полос, отстоящих друг от друга на расстояние, равное длине ПАВ. Это позволяет измерять фазовые скорости, исследовать дифракционные явления, фокусировку ПАВ и т. д. Чувствительность метода, примерно 0,01 нм на частоте 10 МГц. К недостаткам метода относятся зависимость амплитуды выходного сигнала от ориентации ножевой диафрагмы, фокусного расстояния линзы и пространственной частоты ПАВ.

Нами опробирован модифицированный метод «ножевой диафрагмы» (рис. 4). Для детектирования светового потока, отклоненного ПАВ, вместо ножевой диафрагмы используется сдвоенный фотодетектор. При отсутствии ПАВ оба фотодиода равномерно освещены и выходной сигнал дифференциального усилителя равен нулю. При возбуждении ПАВ луч, отраженный от устройства с ПАВ, сдвигается на угол  $2\alpha$ , фотодиоды освещаются неравномерно и на выходе дифференциального усилителя появляется сигнал, содержащий информацию об амплитуде и фазе ПАВ. Удвоение сигнала способствует увеличению отношения сигнал/шум. Лазерный луч модулируется электрооптическим модулятором (ЭОМ) с частотой ПАВ. При этом имеет место стробоскопический эффект. Выходной сигнал двойного фотодетектора меняется в соответствии с фазой ПАВ.

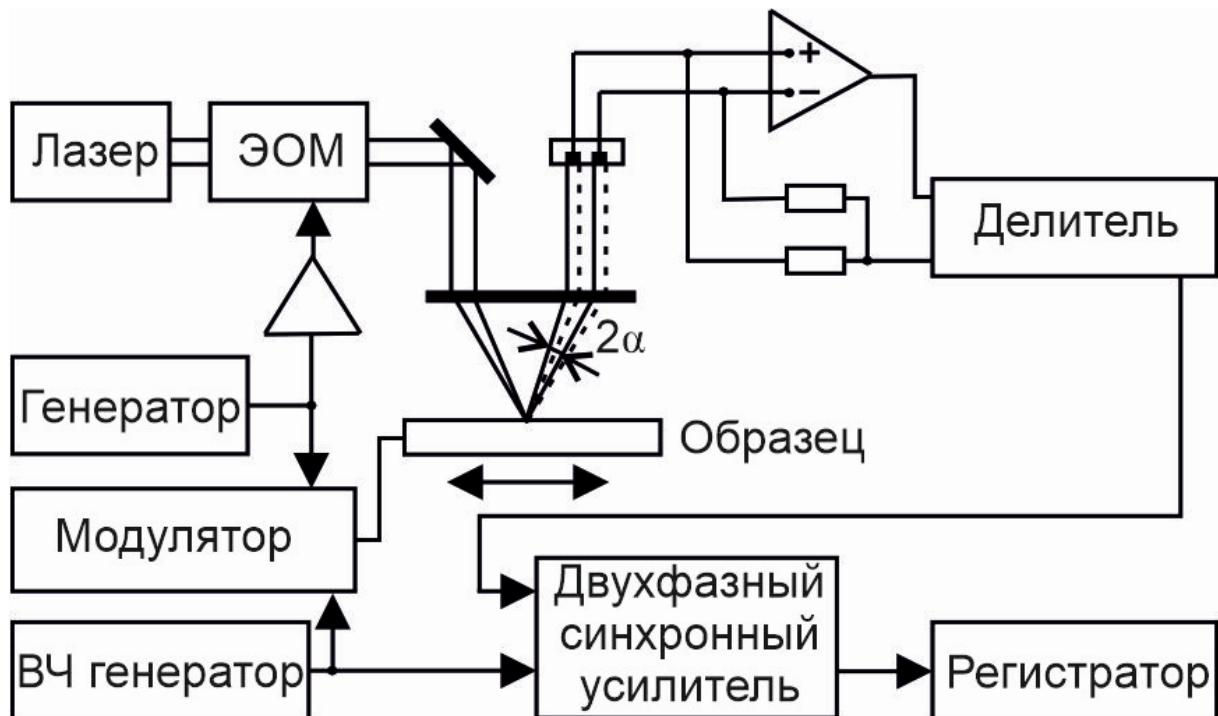


Рис. 4. Блок схема устройства измерения параметров ПАВ на основе модифицированного метода «ножевой» диафрагмы

Приведенная схема детектирования позволяет получать значение амплитуды ПАВ независимо от интенсивности детектированного луча (тем самым независимо от изменения коэффициента отражения подложки, дефектов поверхности и т. д.). Выход синхронного усилителя обычно подключается к Y-входу регистратора. Это позволяет регистрировать амплитуду и фазу ПАВ. Типичный динамический диапазон составляет 70 - 80 дБ на частотах в несколько сотен мегагерц. Частотный диапазон ограничивается возможностью фокусировки светового пучка до размера  $\Lambda/2$ , а также частотным диапазоном электрооптического модулятора. Устройство, как элемент автоматизированной системы научных исследований, позволяет регистрировать и визуализировать импульсные поверхностные акустические волны.

**Выводы.** Таким образом, показаны элементы автоматизированных систем измерения параметров поверхностных акустических волн посредством методов оптического зондирования. Метод стационарной опорной решетки благодаря регистрации отклика на смещенной частоте обладает высокой чувствительностью порядка  $3 \cdot 10^{-4}$  нм. Метод ножевой диафрагмы обладает чувствительностью порядка 0,01 нм на частоте 10 МГц, однако, в нем амплитуда выходного сигнала зависит от ориентации диафрагмы. Метод ножевой диаграммы модифицирован и апробирован, что позволяет регистрировать значения амплитуды ПАВ независимо от интенсивности детектированного луча.

Рассмотренные методы и структуры устройств на их основе пригодны для измерения большинства параметров ПАВ и наряду с электрическими являются незаменимым инструментом в процессе разработки и оптимизации АСНИ параметров ПАВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов, В. В. Измерение параметров устройств на поверхностных акустических волнах / В. В. Данилов, В. И. Тимченко // Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы V Международной научной конференции (Донецк, 17-18 ноября 2020 г.). – Том 1: Физико-математические и технические науки. Часть 2 / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2020. – С. 158-161.
2. Данилов, В. В. Автоматизированные системы научных исследований параметров устройств на поверхностных акустических волнах / В. В. Данилов, В. И. Тимченко // Донецкие чтения 2021: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VI Международной научной конференции (Донецк, 26-27 октября 2021 г.). – Том 2: Физические и технические науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2021. – С. 181-183.
3. Музгин, А. С. Автоматизированная система научных исследований в горном деле / А. С. Музгин. – Алма-Ата: Наука, 2012. – 127 с.
4. Яновский, А. В. Структуры автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн / А. В. Яновский, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 46-53.
5. Тимченко, В. И. Технические и алгоритмические решения для разработки автоматизированной системы измерения параметров упругих колебаний / В. И. Тимченко, В. В. Данилов, И. А. Третьяков // Дефектоскопист – 2021: сборник трудов по неразрушающему контролю / под общ. ред. проф. А. Л. Сотникова. – Донецк: Технопарк «Университетские технологии», 2021. – С. 61-63.
6. Третьяков, И. А. Исследование применимости автоматизированной системы лингвистического анализа экспериментальных данных научных исследований / И. А. Третьяков // Интеллектуальные информационные системы: труды Международной научно-практической конференции (Воронеж, 2-4 декабря 2020 г.); в 2 ч. / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – Ч.2. – С. 38-41.

7. Третьяков, И. А. Исследование спектрограмм радиочастот методами лингвистического анализа / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2020. – № 3. – С. 45-51. – DOI: 10.24143/2072-9502-2020-3-45-51.
8. Третьяков, И. А. Автоматизация процедуры определения параметров упругой среды при ударном воздействии / И. А. Третьяков, В. И. Тимченко, Я. И. Рушечников // Дефектоскопист – 2021: сборник трудов по неразрушающему контролю / под общ. ред. проф. А. Л. Сотникова. – Донецк: Технопарк «Университетские технологии», 2021. – С. 64-66.

*Поступила в редакцию 05.09.2022 г., рекомендована к печати 21.09.2022 г.*

**ELEMENTS OF AUTOMATED SYSTEMS FOR MEASURING PARAMETERS OF SURFACE ACOUSTIC WAVES BY MEANS OF OPTICAL SENSING METHODS**

*Tretiakov I.A., Danilov V.V.*

In this paper, the description of the elements of specialized automated systems for scientific research of the parameters of surface acoustic waves, based on optical sensing, in particular, the method of stationary support grating and the method of "knife diaphragm", is continued.

**Keywords:** automated system, surface acoustic waves, diffraction, optical sensing, diaphragm.

**Третьяков Игорь Александрович**

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

**Tretiakov Igor Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Данилов Владимир Васильевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: ut5iv@mail.ru

**Danilov Vladimir Vasilevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 662.9

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОХОДНОЙ ПЕЧИ С МЕХАНИЗИРОВАННЫМ ПОДОМ, РАБОТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

© 2022 Бирюков А.Б., Турулина Ю.О.

Предлагается способ нахождения рациональных режимных параметров печи, работающей в условиях переменной производительности, путем изменения шага укладки заготовок. Метод позволяет сохранить заданное конечное теплосодержание металла. Совершенствование позволяет увеличить диапазон регулирования параметров печи для определения рациональных режимов.

**Ключевые слова:** проходная печь, шаг укладки заготовок, теплосодержание металла, переменная производительность, итерационный расчет.

**Введение.** В наши дни металлурги постоянно работают над улучшением и рентабельностью процессов тепловой обработки металлов. При использовании пламенных печей эти процессы характеризуются высоким уровнем потребления природного топлива.

Значительная часть расхода топлива приходится на нагрев металла перед обработкой давлением. От качества нагрева металла зависит вся работа прокатного цеха, производительность прокатного стана и качество готовой продукции.

Правильно выбранная технология нагрева металла позволяет значительно снизить расход природного топлива и получить продукт надлежащего качества. Особенно важную роль это играет при работе нагревательных печей в условиях переменной производительности.

При проектировании автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), либо их усовершенствовании широко применяются расчетные методы определения режимных параметров проходных печей [1].

Усовершенствование подходов к определению рациональных режимных параметров возможно с применением методики нахождения однозначного значения температуры уходящих газов [2] или совершенствование расчетной методики определения температурного профиля печи, работающей в условиях пониженной производительности [3].

Целью настоящей работы является расширение диапазона регулирования режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности, за счет изменения шага укладки заготовок.

**Методика определения рациональных режимных параметров печи, работающей в условиях изменяющейся производительности.** В условиях изменяющейся производительности задача определения рациональных режимных параметров выполнялась по методике [3], дополненной однозначным вычислением требуемого шага укладки заготовок.

Дополнения заключаются в следующем. По методике [3] определяются параметры номинального режима при заданном шаге укладки заготовок.

При изменении производительности печи требуемое конечное теплосодержание металла достигается путем выбора рационального шага укладки заготовок, при этом температурный профиль печи остается неизменным, а значит теплосодержание металла и средние тепловые потоки по зонам печи остаются на уровне номинального режима.

Далее задача решается следующим образом. Задается произвольный шаг укладки заготовок и путем интерполяции табличных данных [4] определяются значения коэффициентов несимметричности нагрева.

По формуле Семикина определяется общее время нагрева металла в печи и по зонам соответственно:

$$\tau_i = \frac{\mu \cdot d \cdot \rho \cdot 10^3}{K_1 \cdot \bar{q}_i \cdot 3600} \cdot (i_i - i_{i-1}), \quad (1)$$

где  $\tau_i$  – время нагрева заготовки в печи или в соответствующей зоне, ч;  $\mu$  – коэффициент несимметричности нагрева;  $d$  – толщина заготовки, м;  $\rho$  – плотность материала заготовки, кг/м<sup>3</sup>;  $K_1$  – коэффициент материальной нагрузки;  $\bar{q}_i$  – средняя плотность теплового потока в соответствующей зоне печи, Вт/м<sup>2</sup>;  $i_i$  – среднемассовая энталпия заготовки на выходе из печи или в конце соответствующей зоны, кДж/кг;  $i_{i-1}$  – среднемассовая энталпия заготовки в начале соответствующей зоны печи или начальная энталпия заготовки, кДж/кг.

Определяется скорость нагрева заготовки по формуле:

$$v = \frac{L_o}{3600 \cdot \tau}, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость нагрева заготовки, м/с;  $L_o$  – общая длина печи, м;  $\tau$  – общее время нагрева заготовки, ч.

Шаг укладки заготовок определяется по формуле:

$$a = \frac{3600 \cdot d^2 \cdot l_3 \cdot \rho \cdot v}{P \cdot 10^3} - d, \quad (3)$$

где  $a$  – шаг укладки заготовки, м;  $l_3$  – длина заготовки, м;  $P$  – производительность печи, т/ч.

Затем полученное значение шага укладки заготовок принимаем в качестве следующего приближения и расчет повторяем заново до полного совпадения искомой величины. В качестве примера рассмотрена трехзонная методическая печь общей длиной 27 м. Нагрев осуществляется для квадратной заготовки сечение 0,15x0,15 м и длиной 6 м. За номинальный принят режим нагрева при производительности  $P = 120$  т/ч с шагом укладки заготовок  $a=91$  мм. Температура газов в сварочной зоне 1400 °С, в томильной – 1300 °С. Вычисления выполнялись для производительностей 90 т/ч, 95 т/ч, 100 т/ч, 105 т/ч, 110 т/ч, 115 т/ч, 125 т/ч, 130 т/ч и 135 т/ч. Анализ результатов позволил выявить две особенности. Во-первых, для режима с производительностью 135 т/ч наблюдается недогрев металла (при том, что шаг раскладки уже уменьшен до нуля). Очевидно, что дальнейшее повышение производительности печи без изменения ее температурного профиля невозможно.

Во-вторых, установлено, что постоянство энталпии металла в конце нагрева не достигается однозначно, хотя, максимальная разница менее 1%.

Ранее было предложено допущение о поддержании постоянства величин средних плотностей тепловых потоков в соответствующих зонах печи на уровне номинального режима. Для достижения более полного постоянства энталпии металла в конце нагрева внесены некоторые уточнения. Согласно методике [3], для каждой итерации происходит пересчет величин средних плотностей тепловых потоков в соответствии с формулой Семикина.

Зависимость шага укладки заготовок и удельного расхода тепла от производительности показана на рис. 1 и рис. 2, результаты расчетов приведены в таблице 1.

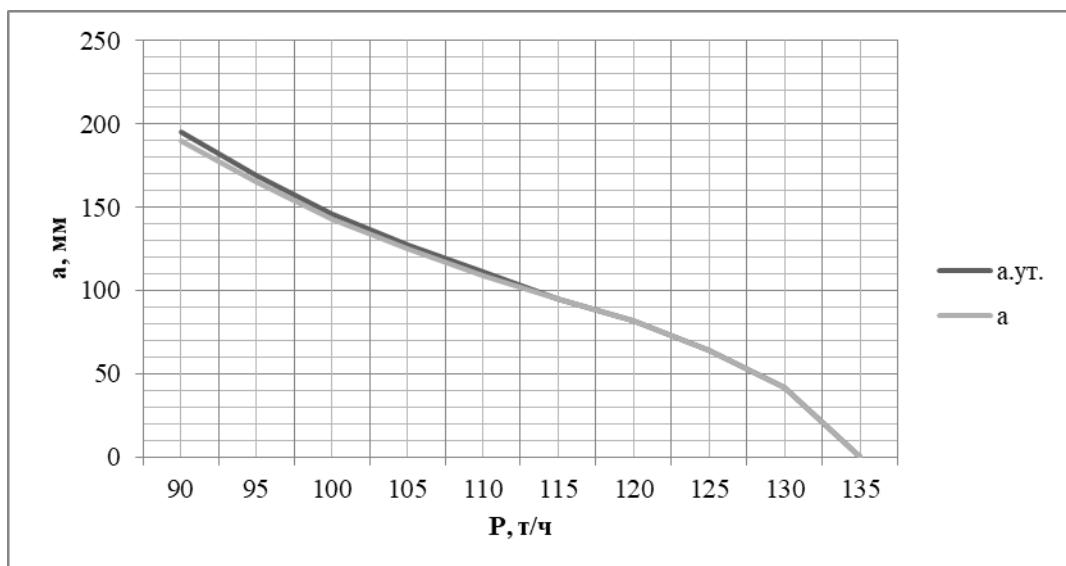


Рис. 1. Зависимость шага укладки заготовок от производительности: a – шаг укладки заготовок согласно предложенной методике; a.ут. – уточненный шаг укладки заготовок

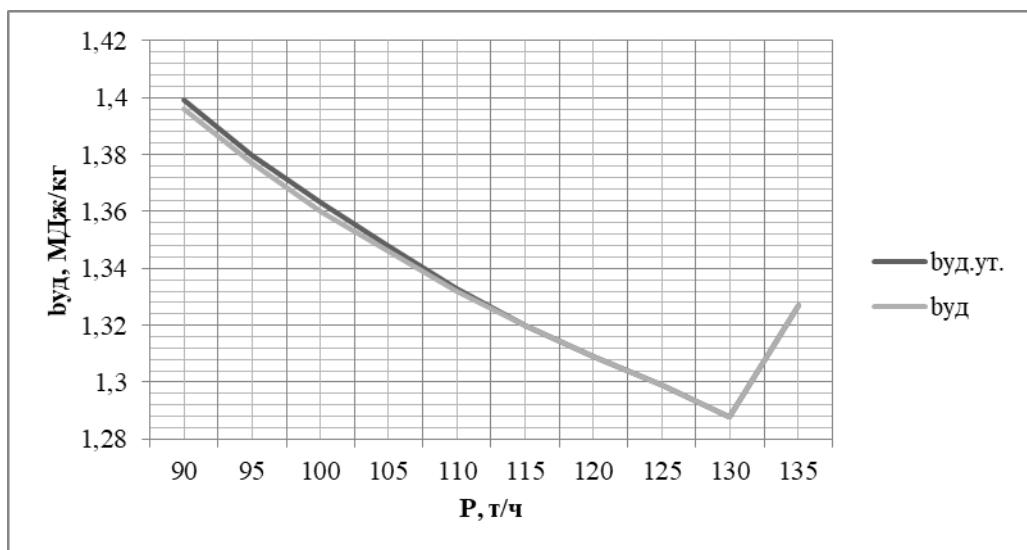


Рис. 2. Зависимость удельного расхода тепла от производительности: буд – удельный расход тепла согласно предложенной методике; буд.ут. – уточненный удельный расход тепла

Таблица 1. Результаты расчетов рациональных режимных параметров трехзонной методической печи, работающей в условиях изменяющейся производительности

	90 т/ч	95 т/ч	100 т/ч	105 т/ч	110 т/ч	115 т/ч	120 т/ч	125 т/ч	130 т/ч	135 т/ч
Шаг укладки заготовок а, мм	190	165	143	125	109	95	82	64	42	0
Уточненный шаг укладки заготовок а, мм	195	169	146	127	111	95	82	64	42	0
Продолжительность нагрева заготовки $\tau$ , ч	0,934	0,957	0,976	0,991	1,005	1,016	1,028	1,071	1,148	1,413
Уточненная продолжительность нагрева заготовки $\tau$ , ч	0,922	0,946	0,967	0,984	1	1,016	1,028	1,071	1,148	1,413
Коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве $\mu_k$	0,453	0,47	0,484	0,493	0,502	0,509	0,518	0,546	0,599	1
Уточненный коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве $\mu_k$	0,45	0,468	0,482	0,492	0,501	0,509	0,518	0,546	0,599	1
Коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве $\mu_l$	0,329	0,336	0,342	0,347	0,351	0,355	0,358	0,372	0,395	0,55
Уточненный коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве $\mu_l$	0,328	0,335	0,341	0,346	0,351	0,355	0,358	0,372	0,395	0,55
Энтальпия металла после методической зоны $i_1$ , кДж/кг	401	399	397	396	394	392	391	390	388	369
Уточненная энтальпия металла после методической зоны $i_1$ , кДж/кг	399	398	396	395	393	392	391	390	388	369
Энтальпия металла на выходе из сварочной зоны $i_2$ , кДж/кг	775	774	773	772	771	770	769	769	769	700
Уточненная энтальпия металла на выходе из сварочной зоны $i_2$ , кДж/кг	770	770	770	770	769	770	769	769	769	700
Энтальпия металла в конце нагрева $i_k$ , кДж/кг	818	817	816	816	815	813	813	813	813	738
Уточненная энтальпия металла в конце нагрева $i_k$ , кДж/кг	813	813	813	813	813	813	813	813	813	738
Удельный расход тепла $b_{уд}$ , МДж/кг	1,396	1,377	1,36	1,346	1,332	1,32	1,309	1,3	1,341	1,435
Уточненный удельный расход тепла $b_{уд}$ , МДж/кг	1,399	1,38	1,363	1,348	1,333	1,32	1,309	1,3	1,341	1,435

Расчеты показали, что работа печи в условиях изменяющейся производительности при неизменном температурном профиле печи возможна за счет определения и установления рационального шага укладки заготовок. При этом достигается заданное конечное теплосодержание металла.

**Выводы.** Предложен расчетный метод определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности. Регулирование осуществляется за счет изменения шага укладки заготовок при неизменном температурном профиле печи. Результаты расчетов показали, что при различной производительности путем определения оптимального шага укладки заготовок возможно получение заданного конечного теплосодержания металла. Показано, что при достижении определенной повышенной производительности дальнейшее регулирование шагом без изменения температурного профиля печи является невозможным. Предполагается расширение диапазона регулирования технологических параметров проходных печей, основанное на оптимизации режимов нагрева.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное издание / В. Л. Гусовский, А. Е. Лицшиц. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
2. Повышение точности определения теплового состояния металла в методической зоне проходной печи при использовании инженерных методов / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Туруллина, С. А. Онищенко // Вестник Института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – 2017. – № 1. – С. 5-10.
3. Бирюков, А. Б. Методика определения температурного профиля методической печи, работающей в условиях пониженной производительности / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Туруллина // Сталь. – 2017. – № 10. – С. 74-77.
4. Казанцев, Е. И. Промышленные печи / Е. И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

*Поступила в редакцию 06.09.2022 г., рекомендована к печати 23.09.2022 г.*

#### **IMPROVEMENT OF THE CALCULATION METHOD FOR DETERMINING THE RATIONAL OPERATING PARAMETERS OF A FLOW FURNACE WITH A MECHANIZED HEARTH OPERATING UNDER VARIABLE PRODUCTIVITY CONDITIONS**

**Biriukov A.B., Turulina Iu. O.**

A method is proposed for finding rational operating parameters of a furnace operating under conditions of variable productivity by changing the step of laying workpieces. The method allows you to save the specified final heat content of the metal. The improvement makes it possible to increase the range of furnace parameters regulation to determine rational modes.

**Keywords:** through furnace, billet laying step, metal heat content, variable productivity, iterative calculation.

#### **Бирюков Алексей Борисович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,

Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

E-mail: birukov.ttf@gmail.com

#### **Biriukov Aleksei Borisovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

#### **Туруллина Юлия Олеговна**

аспирант ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,

Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

E-mail: turulinay@mail.ru

#### **Turulina Iuliia Olegovna**

Postgraduate student of the Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 331.43+658.567.1+661.999+66-936.48

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ПЕРОКСИДНЫХ КОМПОНЕНТОВ СРЕДСТВ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2022 Берестовая А.А., Шаповалов В.В.

Предложен принцип использованием отходов пероксидных соединений лития, натрия и калия, составляющих основу химических комплексов регенерации воздуха коллективных и индивидуальных средств защиты органов дыхания в технологии получения функциональных материалов.

**Ключевые слова:** пероксидные соединения, утилизация, функциональные материалы, технология утилизации, ферриты, магнитные материалы.

**Введение.** Пероксидные и супероксидные соединения щелочных металлов, такие как  $\text{Li}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaO}_2$  и  $\text{KO}_2$ , составляют базовую часть средств регенерации воздуха в изолированных системах [1]. Вследствие своей высокой активности они при обычных условиях легко взаимодействуют с водяным паром и диоксидом углерода с образованием карбонатов соответствующих металлов и кислорода. Для поддержания оптимального дыхательного коэффициента используются композиции супероксидов с оксидами, пероксидами, гидроксидами щелочных или щелочноземельных металлов. Высокая активность химических средств регенерации необходимая для работы в штатном режиме, вызывает в то же время деградацию этих средств уже при незначительной разгерметизации аппаратуры или при длительном хранении, вследствие диффузии водяного пара и диоксида углерода через уплотнительные материалы. Эти моменты ограничивают срок хранения средств регенерации. Основными продуктами деградации пероксидных соединений являются, кроме оставшихся пероксидных соединений, гидроксиды и карбонаты щелочных металлов. Частичное использование этих средств также ограничивает их дальнейшее применение. Так один из основных регенеративных веществ [1] супероксид калия в классификаторе № ООН 2466 характеризуется как сильный окислитель, может вызвать возгорание или взрыв, при попадании на кожу вызывает раздражение, опасен для окружающей среды. Не меньшую опасность представляют и другие пероксидные соединения. Накопление соединений с химически связанным кислородом в производстве или в местах хранения и использования может вызвать непредсказуемые последствия. Вместе с тем, отмечается в [2], что отсутствуют эффективные методы рециклинга кислородсодержащих дорогостоящих продуктов, представляющих высокую материальную ценность.

Анализ последних исследований. Используемые в настоящее время такие способы утилизации средств регенерации как сжигание или гашение кислородсодержащего продукта водой, нейтрализацию раствора и слив его в канализацию не подлежит комментированию. Предлагается способ [3] уменьшения жесткости воды деградированным регенеративным продуктом. При наличии в нем остаточных пероксидных соединений помимо умягчения воды будет протекать ее обеззараживание

образующимся кислородом и пероксидом водорода. Исходя из стоимости пероксидных соединений, способ, вероятно, целесообразно использовать при значительной степени превращения регенеративного продукта в карбонат и/или гидроксид щелочного металла. Такой глубоко деградированный продукт по цене приближается к цене обычных средств умягчения воды, а обработка воды приближается к экономически целесообразному методу. Так, например, если стоимость основного компонента регенеративного продукта  $\text{KO}_2$  достигает ~12 тыс.руб./кг, то стоимость веществ его деградации, таких как  $\text{KOH}$  и  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , составляет около 200-300 руб/кг. Деградированные в малой степени или с истекшим сроком хранения регенеративные продукты, содержащие значительные количества пероксидных соединений, целесообразно использовать в технологиях получения соединений с высокой добавленной стоимостью. К таким соединениям относятся наиболее распространенные и востребованные материалы типа ферритов  $\text{MeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  и шпинелей алюминиевой группы  $\text{MeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , где Me – магний, кобальт, никель, кадмий, цинк и др. Особый интерес представляют наноразмерные порошки, в том числе обладающие магнитными свойствами. Последние перспективны для самого широкого применения [4, 5, 6], как в технике, так и в медицине, например, для ранней диагностики новообразований.

В [7, 8] установлено, что все пероксидные соединения щелочных металлов, содержащиеся в регенеративных продуктах, способны в режиме горения реагировать с солями двух- и трехвалентных металлов с образованием оксидов железа и оксидов цветных металлов составляющих основу функциональных материалов, в частности магнитных материалов. В качестве сырья, содержащего цветные металлы, могут быть использованы, в том числе, продукты комплексной переработки отходов гальванических производств [9]. Соль железа, а именно  $\text{FeSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$  является крупнотоннажным отходом металлургического производства.

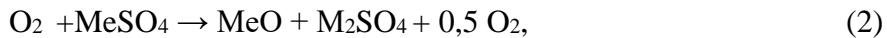
Поскольку взаимодействие между пероксидными соединениями и солями протекает с образованием оксидов в режиме горения [8], то нет необходимости использовать в технологии энергоемкие высокотемпературные печи, которые применяются при получении большинства функциональных материалов. При этом важно отметить, что стоимость функциональных материалов в порошкообразном состоянии соизмерима со стоимостью пероксидных соединений. При получении же функциональных материалов в виде нанопорошков стоимость отдельных видов продукции значительно превосходит стоимость химических регенеративных средств и доходит до 80000 руб/кг.

**Цель работы.** Разработать технологические принципы использования отходов пероксидных составляющих средств регенерации воздуха в технологии получения функциональных материалов.

**Метод исследования.** Расчеты характеристик предлагаемых реакций проводились на основе фундаментальных основ химической термодинамики. Магнитные измерения полученных образцов функциональных материалов проведены на вибрационном магнитометре фирмы «LakeShore модель 7407». Рентгенофазовый анализ материалов выполнен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2 в монохроматизированном  $\text{Cu}-\text{K}_{\alpha}$  излучении. Для проведения химического микроанализа применяли растровый электронный микроскоп РЭММА – 102 – 02.

**Изложение основного материала.** Как отмечалось, основу большого разнообразия функциональных материалов составляют вещества, в состав которых входят оксиды железа и цветных металлов. Взаимодействие безводных солей, в частности сульфатов ряда металлов, с пероксидными соединениями щелочных

металлов протекают в соответствии с суммарными уравнениями (1) и (2) с образованием оксидов металлов, что подтверждается данными рентгенофазового анализа (табл. 1).



где Me – Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>; M – Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup> (только Li<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Таблица 1. Данные рентгенофазового анализа нерастворимого продукта взаимодействия некоторых солей с пероксидными соединениями щелочных металлов

Исходная соль	Характеристические рефлексы на рентгенограмме, ангстрем	Отнесение рефлексов
NiSO <sub>4</sub>	2,4122,0901,4781,476	NiO
CoSO <sub>4</sub>	1,506; 1,2846; 1,2298	CoO
Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , CdSO <sub>4</sub>	2,712; 2,351; 1,661; 1,416; 1,355; 1,174	CdO
MgSO <sub>4</sub>	2,431; 2,106; 1,489	MgO
PbSO <sub>4</sub>	2,946; 2,744; 2,377; 2,008 3,115; 2,809; 2,502; 1,870; 1,675	β-PbO α-PbO
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	3,479; 2,552; 2,379; 2,085; 1,740; 1,601	α-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

В качестве солей, кроме сульфатов могут быть использованы хлориды металлов и, в некоторой степени, фосфаты. Нитраты двухвалентных металлов, кроме сложности их получения в безводном состоянии, в смесях с пероксидными соединениями из-за легкости воспламенения, представляют собой определенную опасность при работе [7].

В отходах регенеративного продукта вследствие контакта его с водой и диоксидом углерода воздуха содержатся карбонаты и гидроксиды щелочных металлов. Расчет термодинамических параметров реакций взаимодействия солей с данными ингредиентами (табл. 2 и 3) показывает, что реакции термодинамически возможны и являются экзотермическими. Следовательно, эти продукты деградации регенеративного продукта в целом не препятствуют реакциям 1 и 2. При этом, как видно (табл. 2), характеристики реакций солей с гидроксидом и супероксидом калия практически не отличаются.

Таблица 2. Величины тепловых эффектов и изобарно-изотермического потенциала реакций взаимодействия гидроксида калия с солями некоторых двухвалентных металлов

Реакция	$Q_{298}^0$ , кДж/моль	$\Delta G_{298}^0$ , Дж/моль	$Q_{298}^0$ , кДж/моль. Соль + KO <sub>2</sub> [8]
MnSO <sub>4</sub> + 2 KOH = MnO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	194.223	-205.102	191.234
FeSO <sub>4</sub> + 2 KOH = FeO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	214.883	-225.285	211.894
CoSO <sub>4</sub> + 2 KOH = CoO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	226.343	-232.653	223.354
NiSO <sub>4</sub> + 2 KOH = NiO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	245.083	-248.59	242.094
CuSO <sub>4</sub> + 2 KOH = CuO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	260.173	-268.331	257.184
ZnSO <sub>4</sub> + 2 KOH = ZnO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	242.713	-251.3	239.724
MgSO <sub>4</sub> + 2 KOH = MgO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	198.193	-196.83	195.204
CaSO <sub>4</sub> + 2 KOH = CaO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	73.123	-80.323	70.134
BaSO <sub>4</sub> + 2 KOH = BaO + K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	-31.947	21.829	-34.936

Взаимодействие солей с карбонатами щелочных металлов, термодинамически возможно ( $\Delta G_{298}^0 < 0$ , табл. 3), но характеризуется незначительными тепловыми эффектами, и при значительном содержании карбонатов в регенеративном продукте реакции невозможно провести в режиме горения, что значительно снижает энергетическую эффективность технологии утилизации.

В некоторых регенеративных продуктах содержатся компоненты, присутствие которых нежелательно в функциональных материалах. Так в известных продуктах ОКЧ кроме  $KO_2$  содержится до 15 % оксида кальция ( $CaO$ ) и ~2% хризотилового асбеста, представляющего собой гидросиликат магния общей формулы  $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Данные вещества, являются загрязнителями целевого продукта, что несколько усложняет технологию.

Таблица 3. Величины тепловых эффектов и изобарно-изотермических потенциалов реакций взаимодействия карбоната калия с солями некоторых двухвалентных металлов

Реакция	$Q_{298}^0$ , кДж/моль	$\Delta G_{298}^0$ , кДж/моль
$MnSO_4 + K_2CO_3 = MnO + K_2SO_4 + CO_2$	-1.851	-52.51
$FeSO_4 + K_2CO_3 = FeO + K_2SO_4 + CO_2$	18.809	-72.693
$CoSO_4 + K_2CO_3 = CoO + K_2SO_4 + CO_2$	30.269	-80.061
$NiSO_4 + K_2CO_3 = NiO + K_2SO_4 + CO_2$	49.00	-95.998
$CuSO_4 + K_2CO_3 = CuO + K_2SO_4 + CO_2$	64.099	-115.739
$ZnSO_4 + K_2CO_3 = ZnO + K_2SO_4 + CO_2$	46.639	-98.708
$MgSO_4 + K_2CO_3 = MgO + K_2SO_4 + CO_2$	2.119	-44.238
$CaSO_4 + K_2CO_3 = CaO + K_2SO_4 + CO_2$	122.951	72.269
$BaSO_4 + K_2CO_3 = BaO + K_2SO_4 + CO_2$	228.021	174.421

Таким образом, технология получения функциональных материалов должна учитывать химический состав деградированного регенеративного продукта, прежде всего наличие карбонатов, и добавленных в него компонентов.

На рис. 1 представлена принципиальная схема технологии утилизации регенеративного продукта с получением порошков функциональных магнитных материалов. Как пример, в качестве исходных компонентов, рассматриваются сульфаты солей и регенеративный продукт на основе супероксида калия.

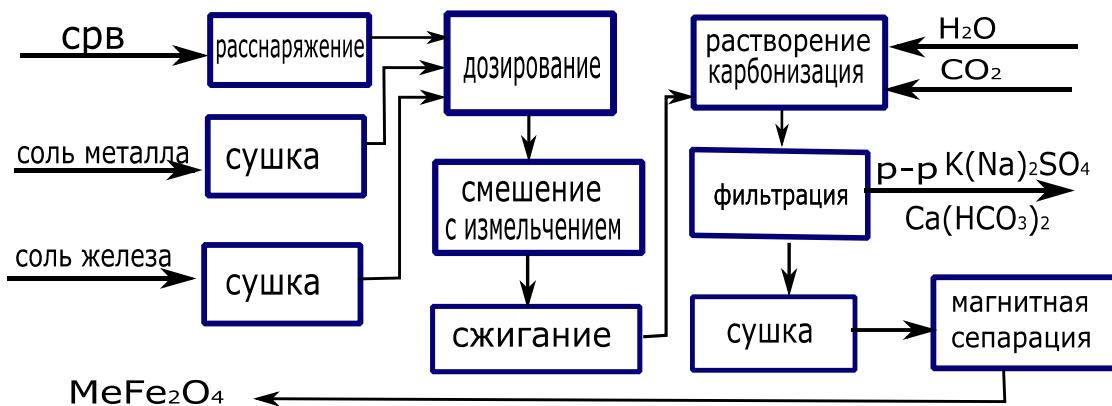


Рис.1. Принципиальная технологическая схема утилизации пероксидных компонентов средств регенерации воздуха (CPB) с получением функциональных материалов

На первой стадии осуществляется расснаряжение партии средств регенерации с отделением регенеративного продукта и его анализ. Продукт с высоким содержанием пероксидных соединений направляется на стадию взвешивания и дозирования. Сюда же поступают после сушки соли железа и других металлов.

На второй стадии происходит расчет и дозирование материалов в соответствии с необходимым количеством для протекания реакций приведенных в табл. 4. Главное условие при расчете соотношения пероксид/соль состоит в связывании аниона солей  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Избыточное количество регенеративного продукта не влияет на протекание процессов. При недостатке возможна потеря металлов на последующих стадиях технологии вследствие образования растворимых солей типа  $\text{K}_2[\text{Me}(\text{SO}_4)_2]$ . На третьей стадии компоненты стандартными способами смешиваются в присутствии мелющих тел обеспечивающих качественное смешение.

Таблица 4. Тепловые эффекты образования магнитных материалов в реакциях солей с супероксидами натрия и калия

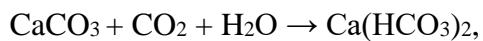
Реакция	$Q_{298}^0$ , кДж/моль
$8 \text{NaO}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{NiSO}_4 = 4 \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{NiFe}_2\text{O}_4 + 6 \text{O}_2$	1103
$8 \text{KO}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{NiSO}_4 = \text{NiFe}_2\text{O}_4 + 4 \text{K}_2\text{SO}_4 + 6 \text{O}_2$	1110
$6 \text{KO}_2 + 2 \text{FeSO}_4 + \text{NiSO}_4 = \text{NiFe}_2\text{O}_4 + 2\text{K}_2\text{SO}_4 + 4 \text{O}_2$	956
$6 \text{KO}_2 + 2 \text{FeSO}_4 + \text{CoSO}_4 = \text{CoFe}_2\text{O}_4 + 2\text{K}_2\text{SO}_4 + 4 \text{O}_2$	961
$6 \text{KO}_2 + 2 \text{FeSO}_4 + \text{ZnSO}_4 = \text{ZnFe}_2\text{O}_4 + 2\text{K}_2\text{SO}_4 + 4 \text{O}_2$	963
$8 \text{NaO}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{BaSO}_4 = 4 \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{BaO-Fe}_2\text{O}_3 + 6 \text{O}_2$	806
$8 \text{KO}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{BaSO}_4 = \text{BaO-Fe}_2\text{O}_3 + 4 \text{K}_2\text{SO}_4 + 6 \text{O}_2$	803

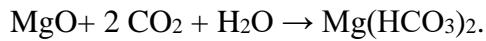
Смесь после смешения инициируется высокотемпературным импульсом, в результате чего по смеси протекает волна горения с образованием нерастворимого целевого продукта  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$  и растворимых солей щелочных металлов (например,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ). Процесс горения сопровождается выделением кислорода, что должно быть учтено с точки зрения безопасности.

Состояние примесных компонентов в продуктах сгорания зависит как от их первоначального состояния в регенеративном продукте, так и от режимов горения – температуры, избытка/недостатка супероксида калия. Для соединений кальция этооксид  $\text{CaO}$  или карбонат  $\text{CaCO}_3$ . Асбест при стехиометрическом количестве сохранится, а при избытке супероксида калия в смеси часть его будет разрушена с образованием  $\text{MgO}$ ,  $\text{KOH}$  и  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ :



Таким образом, продукт горения может включать в разной степени такие вещества как  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{KOH}$ , асбест. Технология предполагает разделение данных компонентов водой в два этапа. На первом этапе при обработке водой в раствор перейдут хорошо растворимые  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{KOH}$  и некоторое количество  $\text{CaO}$  в виде извести  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . На втором - оставшийся после отделения твердый осадок повторно обрабатывается водой с насыщением ее диоксидом углерода. При этом соединения кальция и магния перейдут в раствор в виде растворимых гидрокарбонатов:





Возможные остатки асбеста могут быть удалены из целевого продукта магнитной сепарацией, поскольку асбест не является магнитным материалом в отличие от целевого функционального материала. На рис.2 представлена рентгенограмма функционального материала полученного в лабораторных условиях по представленной технологии. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной технологии.

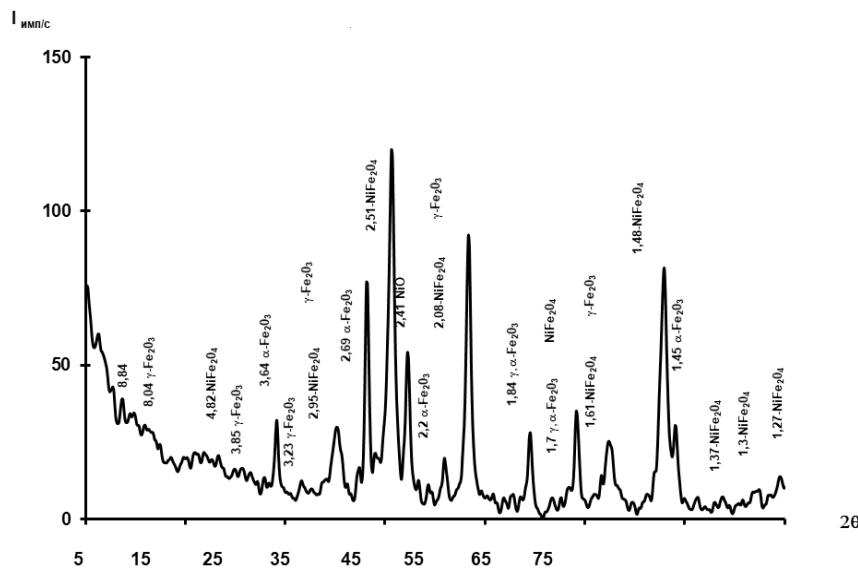


Рис. 2. Рентгенограмма очищенного продукта взаимодействия регенеративного продукта со смесью сульфатов никеля и железа. Цифры на рефлексах рентгенограммы – межплоскостные расстояния в ангстремах

Магнитные свойства полученного порошка подтверждены магнитными измерениями (рис. 3). Электронно-микроскопические измерения показали, что размер частиц находится в нанометровом диапазоне. Порошки обладают высокой текучестью и под действием магнита перемещаются подобно жидкости (рис. 4).

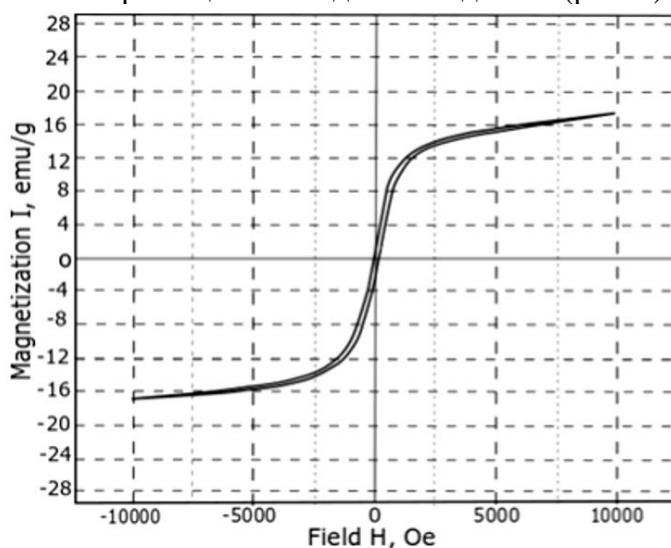


Рис. 3. Кривая гистерезиса полученного нанопорошка магнитного материала NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> в магнитном поле



Рис. 4. Поведение полученного нанопорошка магнитного материала  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  в магнитном поле

**Выводы.** Предложен принципиально новый способ утилизации пероксидных компонентов средств регенерации воздуха и изолирующих средств защиты органов дыхания с получением материалов с высокой добавленной стоимостью. Рассмотрена принципиальная технологическая схема реализации данного способа утилизации. Предложенный метод подтвержден экспериментально получением функциональных магнитных материалов наноразмерного диапазона.

В развитии предложенного метода интерес представляет расширение круга получаемых материалов, в том числе шпинелей алюминиевой группы  $\text{MeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , которые интересны как красители, так и основа драгоценных камней. При этом необходимо провести исследования по выяснению степени деградации регенеративных продуктов, которая не будет препятствовать осуществлению данного метода.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гладышев, Н. Ф. Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2016. – 204 с.
- Плотников, Д. А. Анализ проблемы образования отходов шахтных самоспасателей на химически связанным кислороде в условиях ДНР / Д. А. Плотников// Вестник ДонНАСА «Инженерные системы и техногенная безопасность»: сб. науч. трудов. Макеевка: ДонНАСА. – 2019. – №5 (139). – С.26-31.
- Высоцкий, С. П. Использование отходов самоспасателей на химически связанным кислороде для снижения карбонатной жесткости шахтной воды / С. П. Высоцкий, Д. А. Плотников, В. В. Мамаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – №7 (239). – С. 172–181.
- Lu, A.-H. Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application / A.-H. Lu, E. L. Salabas, F. Schuth// Angew. Chem. Int. Ed. – 2007. – V. 46(8). – P. 1222–1244.
- Mosiniewicz-Szablewska, E. Studies of Ferrofluid-Modified Microbial Cells / E. Mosiniewicz-Szablewska, MirkaSafarikova, I. Safarik // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2010. – Vol. 10, – P. 2531–2536.
- Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / С. П. Губин, Ю. А. Кокшаров, Г. Б. Хомутов, Г. Ю. Юрков // Успехи химии. – 2005. – Т.74. – С. 539-574.
- Берестовая, А. А. Термодинамический анализ процесса горения в оксидно- и пероксидно-солевых системах / А. А. Берестовая, В. В. Шаповалов // Научный вестник НИИГД «Респиратор» – 2022. – № 2(59). – С.26-33.

8. Берестовая, А. А. Процессы горения твердофазных систем оксидных соединений калия и лития с солями двухвалентных металлов / А. А. Берестовая, В. В. Шаповалов // Вестник Академии гражданской защиты. – 2022. – Выпуск 3 (31). – С.29-37
9. Мнускина, Ю. В. Комплексная переработка отходов гальванического производства / Ю. В. Мнускина // Проблемы экологии: общегосударственный научно-технический журнал. – 2013. – Вып. 2(32). – С.62-68.

*Поступила в редакцию 02.09.2022 г., рекомендована к печати 20.09.2022 г.*

**THE USE OF WASTE PEROXIDE COMPONENTS OF AIR REGENERATION MEANS IN  
THE TECHNOLOGY OF OBTAINING FUNCTIONAL MATERIALS**

*Berestovaia A.A., SHapovalov V.V.*

The principle of using waste peroxide compounds of lithium, sodium and potassium, which form the basis of chemical complexes of air regeneration of collective and individual respiratory protective equipment in the technology of obtaining functional materials, is proposed.

**Keywords:** peroxide compounds, recycling, functional materials, recycling technology, ferrites, magnetic materials.

**Берестовая Алина Анатольевна**

старший преподаватель кафедры прикладной экологии и охраны окружающей среды ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: berestova865@gmail.com

**Berestovaia Alina Anatolevna**

Senior Lecturer of the Department of Applied Ecology and Environmental Protection of the Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Шаповалов Валерий Васильевич**

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии и охраны окружающей среды ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: wwshapovalov@gmail.com

**SHapovalov Valerii Vasilevich**

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Ecology and Environmental Protection of the Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список литературы, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru) высыпается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
  - **Размер бумаги:** А4.
  - **Ориентация:** книжная.
  - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
  - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
  - **Межстрочный интервал:** одинарный.
  - **Абзацный отступ:** 1 см.
  - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
  - **Аннотация, список литературы, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
  - **Подрисуточные подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и **год** – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела **фамилия(и) и инициалы автора(ов)** – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание **Ключевые слова:** – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотации и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых литературных источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо включение в список литературы источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г., рекомендована к печати xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, **фамилия(и) и инициалы автора(ов)**, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
  - **Фамилия, имя, отчество;**
  - ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
  - страна, город;
  - адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 621.377.037.3:004.67

## МЕТОД РАСШИРЕННОГО ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СПЕКТРОГРАММ РАДИОЧАСТОТ FM-ДИАПАЗОНА

© 2022 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В настоящей работе проведено расширение функциональности разработанной ранее автоматизированной системы научных исследований. Предлагается метод более расширенного лингвистического описания спектрограмм радиочастот, позволяющий составлять эти описания с учетом местоположения участков кривой на оси абсцисс.

**Ключевые слова:** спектрограммы радиочастот, лингвистический анализ, анализ данных.

**Введение.** В современном мире развивается научное направление [1-3] ...

**Постановка задачи.** Представляется важным выявление [4] ...

**Метод расширенного лингвистического описания.** Для составления такого ...

**Выводы.** Полученные расширенные лингвистические описания дают ...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев, Д. Р. Сравнительный анализ двухфакторной аутентификации / Д. Р. Юрьев, О. С. Рогова // Технические науки – от теории к практике. – 2017. – № 6 (66). – С. 46–51.
2. Защита сервера от DDos-атак. – URL: <https://itelon.ru/blog/zashchita-servera-ot-ddos-atak/> (дата обращения: 20.03.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

*Поступила в редакцию xx.xx.2022 г., рекомендована к печати xx.xx.2022 г.*

## METHOD OF EXTENDED LINGUISTIC DESCRIPTION OF FM RADIO FREQUENCY SPECTROGRAMS

*Tretiakov I.A., Danilov V.V.*

In this paper, the functionality of the previously developed automated system of scientific research is expanded. A method of a more extended linguistic description of radio frequency spectrograms is proposed, which makes it possible to compile these descriptions taking into account the location of the curve sections on the abscissa axis.

**Keywords:** radio frequency spectrograms, linguistic analysis, data analysis.

### Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

### Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

### Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: ut5iv@mail.ru

### Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуочную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуочная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

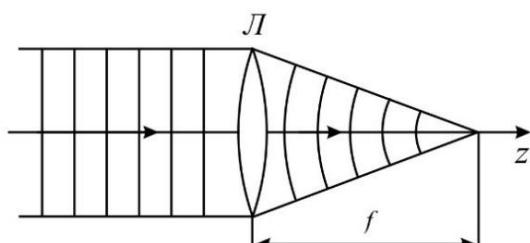


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F<sub>3</sub>

Элемент	Номинал	Единица измерения
C <sub>out</sub>	25	пФ
C <sub>1</sub>	10	нФ
C <sub>2</sub>	100	мкФ
L <sub>1</sub>	150	мкГн
L <sub>2</sub>	460	нГн
L <sub>3</sub>	765	нГн
R <sub>1</sub>	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t . \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк,  
пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

**Главный редактор:** Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

**Зам. главного редактора:** Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

**Ответственный секретарь:** Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

**Контактный тел.:** +7 (856) 302 07 81

**E-mail:** [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)

*Научное издание*

**Вестник Донецкого национального университета.  
Серия Г: Технические науки**

**– 2022. – № 3.**

Технические редакторы: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

---

Адрес редакции:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24  
Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88  
E-mail: [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)  
URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

---

Подписано в печать 07.10.2022 г. Напечатано

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 7,9.

Тираж 100 экз. Заказ. №

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»  
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.  
Тел.: +38 (062) 302 92 27.

Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности  
в Государственный реестр  
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.